

УДК 556 : 579.68

ЭКОЛОГО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГРУППЫ Fe(III)-ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ БАКТЕРИЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР САМАРСКОЙ ЛУКИ

© 2025 Н.Г. Шерышева

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

Из донных отложений разнотипных илов озер Самарской Луки получены накопительные культуры Fe(III) восстанавливающих бактерий, окисляющих анаэробно глюкозу, водород и метан. В составе бактериобентосных сообществ выявлено 38 таксонов домена *Bacteria*, принадлежащих 5-ти филумам *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroides*, *Spirochaetes*. Определены доминирующие таксоны, осуществляющие анаэробную Fe(III) редукцию. Показано влияние типа ила, pH среды, окислительно-восстановительных условий и генезиса органического вещества илов на формирование структурообразующего комплекса бактериальных сообществ. Реакцией сообщества на введенные субстраты являлось изменение состава функциональных групп бактерий. В мелкопесчанистом железистом иле из оз. Золотенка в Fe(III) восстанавливающем микробном сообществе, окисляющем глюкозу, широко представлены доминанты целлюлозолитики *Agrobacterium radiobacter*, бродильщики р. *Clostridium*, ацетогены р. *Acetobacterium*, организмы сем. *Enterobacteriaceae*, осуществляющие разложение органических полимеров. В сообществе, окисляющем водород, массовое развитие получили водородные бактерии рр. *Hydrogenophaga*, *Pseudomonas*, *Bacillus* анаэробные бродильщики *Cl. propionicum*, сульфатредукторы р. *Desulfobacter*, группа железоредукторов *Geobacter sulfurreducens*, FeRB Lovley, FeRedKM. В тонкодисперсном растительном иле из оз. Бездонное структурообразующий бактериальный комплекс, окисляющий глюкозу в процессе Fe(III) редукции, представлен разнообразием бродильщиков: рр. *Butyrivibrio*, *Cl. pasteurianum*, *Cl. propionicum*, *Propionibacterium freudenreichii*. Введение в газовую фазу накопительной культуры метана стимулировало развитие метанотрофов р. *Methylococcus*, водородных бактерий *Rhodococcus terrae*, бродильщиков р. *Butyrivibrio*. Диссимиляционные железоредукторы были наиболее многочисленны в сообществах бактерий, окисляющих водород и метан. Таксономический состав бактериобентосных сообществ определен методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии микробных маркеров.

Ключевые слова: таксономический состав, накопительные культуры, Fe(III) восстанавливающие бактерии, структурообразующий комплекс, тип ила, условия среды, глюкоза, водород, метан

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-404-412

EDN: SEFURS

Исследования проведены в рамках темы государственного задания

«Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем», рег. № 1024032600218-3-1.6.20

ВВЕДЕНИЕ

В донных отложениях озер благодаря жизнедеятельности микроорганизмов минерализуется огромное количество органических и неорганических соединений. Железо имеет фундаментальное значение для энергетического и конструктивного обмена в живых организмах, а также для осуществления ими глобальных превращений вещества и энергии. Состояние железа в биосфере контролируется, прежде всего, бактериями, и именно бактерии служат мостом, который соединяет абиотические пулы элемента с клеточным пулом [1]. Кроме того, было установлено, что железовосстанавливающие бактерии участвуют в биохимическом круговороте углерода, миграции железа, фосфатов, микроэлементов, осуществляют анаэробное окисление органического вещества, деструкцию сложно окисляемых загрязнителей, включая углеводороды, ароматические соединения (производные нефти), восстановление тяжелых металлов.

Органическое вещество из водной толщи поступает в донные отложения и проходит стадии аэробного и анаэробного разложения. Основным терминальным звеном анаэробной деструкции органического вещества в пресноводных объектах является метан, концентрация которого в разнотипных донных отложениях варьирует в широких пределах (0,4–92 мл CH₄/дм³) [2]. Метан относится к наиболее загрязняющим атмосферу газам, влияет на глобальный климат Земли: достигая озоново-

Шерышева Наталья Григорьевна, кандидат биологических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории гидробиологии,
E-mail: sapfir-sherry@yandex.ru

го слоя, участвует в парниковом эффекте. Следовательно, микроорганизмы анаэробных сообществ, окисляющие метан, являются мощным барьером эмиссии метана в атмосферу, что является одной из актуальных проблем современности в области климата [3, 4, 5, 6]. Ж.С. Потехиной была предложена концепция анаэробного окисления метана в процессе диссимиляционной Fe(III) редукции [3, 7]. При развитии анаэробных условий Fe(III) редукция становится доминирующим процессом в разложении органической материи [8, 9, 10]. В связи с этим становятся актуальными исследования, направленные на поиск активных видов Fe(III) редуцирующих бактерий, окисляющих метан и другие органические вещества в последовательных окислительно-восстановительных реакциях.

Впервые процесс Fe(III) восстановления в донных отложениях озер Самарской Луки изучался в ИЭВБ РАН [3]. На примере бактериальных накопительных культур, выделенных из донных отложений озерных илов, было установлено, что в процессе анаэробного Fe(III) восстановления участвуют сообщества донных микроорганизмов различных эколого-функциональных групп: аммонификаторы, бродильщики, цитрат-, лактат-, ацететоксилирующие бактерии, метило-, метанотрофы, водородокисляющие бактерии. Степень участия накопительных культур бактерий в восстановлении железа составляла 16–70% [11, 12]. Fe(III) восстанавливающие бактерии, окисляющие глюкозу, водород, метан проявили наибольшую активность [3].

Целью настоящей работы является изучение таксономического состава сообществ Fe(III) восстанавливающих бактерий, окисляющих промежуточные и конечные продукты анаэробного распада (глюкозу, водород, метан), определить влияние условий среды в разнотипных илах на формирование структурообразующего бактериобентосного комплекса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили накопительные культуры Fe(III) восстанавливающих бактерий, полученные из донных отложений карстовых озер Золотенка и Бездонное, расположенных на территории НП «Самарская Лука» (рис. 1). Исследования проводились в 2005–2012 гг. в Институте экологии Волжского бассейна РАН.

Озеро Бездонное – небольшой водоем в лесостепной части Самарской Луки с максимальной глубиной 8,0 м. Зеркало озера в момент исследований было почти полностью покрыто толстым (до 3 см) слоем ряски *Lemna minor* L. с примесью многокоренника *Spirodella polyrrhiza* (L.) Schleid. и окружено сплошной сплавной из рогоза широколистного *Typha latifolia* L. шириной до 3 м [13]. Цветность воды оставляла 56° Pt-Co. В озере сформировался тонкодисперсный детритный ил, преимущественно растительного генезиса. Для ила характерны восстановительные условия, слабокислая реакция среды, высокое содержание органического вещества и общего фосфора (табл. 1).



Рис. 1. Схема расположения озер на территории Национального парка «Самарская Лука»:

I – карстовая возвышенность;

II – надпойменная терраса;

III – пойма

Оз. Золотенка:

53°20,693' С.Ш.; 49°37,447' В.Д.;

Оз. Бездонное:

53°18,315' С.Ш.; 49°39,380' В.Д.

Озеро Золотенка с максимальной глубиной 5,8 м отличалось очень высокой цветностью воды (169° Pt-Co). Воздушно-водная растительность в озере почти полностью отсутствовала. На глубине залегал мелкий песок, в прибрежье – мелкопесчанистый ил, на поверхности которого развивались обильные железистые образования гидроксидов железа («железистый ил»). Ил анаэробный, с высоким содержанием общего железа и кислой реакцией среды, обеднен органическим веществом и фосфором (табл. 1). При микроскопическом анализе ила было обнаружено множество пустых створок диатомовых водорослей.

Накопительные культуры микроорганизмов готовили сразу же после извлечения грунтовой колонки. Отобранный ил (10%) немедленно вводили в пробирки с анаэробно приготовленными питательными средами, закрытые резиновыми пробками и завинчивающимися пластмассовыми колпачками [7]. Маслянокислые микроорганизмы, осуществляющие процесс брожения, культивировали на среде Дзюбан [15]. Основой для культивирования метанотрофов и водородокисляющих бактерий служила среда «А» [16]. В метанотрофных культурах 12% азота из газовой фазы замещали

Таблица 1. Тип ила и физико-химические параметры донных отложений озер Самарской Луки [13]

Озеро	Тип грунта	T, °C	pH	rH ₂ *	Fe _{общ} мг/10г сырого ила	C _{орг} , мг/л	P _{общ} , мг/л
Золотенка	Мелкопесчанистый ил, покрытый гидроксидами железа	21,5	5,7	8	4,0	203	0,48
Бездонное	Тонкодисперсный ил с растительным детритом	12,0	6,5	13	2,8	322	2,3

Примечание: * – rH₂, показатель, объединяющий Eh и pH: анаэробные условия соответствуют диапазону 0 < rH₂ < 12-13, микроаэробные – 12-13 < rH₂ < 18-20, аэробные – rH₂ > 20 [14]

смесью газов CH₄:CO₂ (90%: 10%), в водородоокисляющих – 10% азота замещали смесью газов H₂:CO₂ (90%:10%). В качестве акцептора электронов в питательные среды вводили пирофосфат трехвалентного железа Fe₄(P₂O₇) в конечной концентрации по железу 15мМ/л. В результате культивирования были получены накопительные культуры бродильных, водород- и метаноокисляющих бактерий, восстановивших 40-60% введенного Fe(III).

Для изучения таксономического состава бактериальных сообществ был применен высокочувствительный метод газовой хроматографии – масс-спектрометрии в (ГХ-МС) с использованием разработанной базы микробных маркеров [17, 12]. Метод позволяет определить родовую/видовую принадлежность бактерий численностью более 10⁴ кл/г ила. Анализ проведен автором метода Г.А. Осиповым на хромато-масс-спектрометре AT 5973 фирмы Agilent Technologies в лаборатории Академической группы Академика РАНН Ю.Ф. Исакова (г. Москва). Отнесение микроорганизмов к функциональным группам производили по Определителю бактерий Берджи [18, 19].

Для количественной оценки степени доминирования таксонов применяли шкалу рангов по численности: более 10% – доминанты; 5-10% – субдоминанты; 1-5% – второстепенные виды; менее 1% малозначимые виды [20]. Структурообразующий комплекс анализируемых сообществ включал доминантные и субдоминантные таксоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом ГХ-МС в озерных железовосстанавливающих бактериобентосных сообществах нами было выявлено 38 таксонов родового и видового рангов домена *Bacteria*, принадлежащих к 5-ти филумам – *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroides*, *Spirochaetes*. В накопительных железовосстанавливающих бактериальных культурах обнаружены представители различных физиологических групп микроорганизмов, осуществляющих поэтапное разложение органического вещества в донных отложениях озер: аэробный гидролиз, анаэробное разложение органического вещества, терминальную анаэробную деструкцию (табл. 2).

Полученные нами данные по таксономическому составу микробных сообществ согласуются с метагеномными исследованиями других авторов. Так, в тундровых почвах наиболее широко представлены микроорганизмы бактериальных филумов: *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes*, *Chloroflexi*, *Bacteroidetes*, *Acidobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Planctomycetes*, железовосстанавливающие бактерии родов *Geobacter* и *Desulfuromonas* [4]. В иле термального источника доминирующими филотипами являлись *Firmicutes*, *Thermomonas*, *Proteobacteria*, в минорных филотипах присутствовали железоредукторы *Geobacter* и *Shewanella* [21]. Анализ структуры микробных сообществ в глубинных донных осадках оз. Байкал, в местах нефтепроявлений и образования метана, выявил девять филумов доменных бактерий: *Chloroflexota*, *Pseudomonadota*, *Actinomycetota*, *Nitrospirota*, *Acidobacteriota*, *Bacteroidota*, *Desulfobacterota*, *Atribacterota*, *Caldisericota* [6].

Экспериментально установлено, что Fe(III) редукция с окислением конечных продуктов метаболизма зависит от pH илов [3]. Численность бактерий в накопительных культурах, полученных из кислого мелкопесчанистого железистого ила (pH=5,7) оз. Золотенка, была значительно меньше (N=33,39×10⁶ кл/сухого ила) по сравнению с накопительными культурами из тонкодисперсного растительного ила (pH=6,5) оз. Бездонное – N=600,38×10⁶ кл/сухого ила.

Fe(III) восстанавливающие бактерии, окисляющие глюкозу. Глюкоза является типичным субстратом бродильщиков, в ее сбраживании участвуют маслянокислые, молочнокислые, ацетатные бактерии. Этот путь распространен среди аэробных и многих анаэробных органотрофных сахаролитических организмов, участвующих в разложении углеводов. В результате образуются водород, жирные кислоты, метиловый и этиловый спирты, ацетат [3], что обуславливает развитие разных функциональных групп бактерий.

Таблица 2. Таксономический состав Fe(III) восстанавливающих бактерий, окисляющих глюкозу, водород и метан в анаэробных условиях

Таксоны	Субстраты					Функция
	Глюкоза*	H ₂ *	Глюкоза**	CH ₄ **	O ₂	
<i>Caulobacter</i>	0,08	0,15	6,38	0,64	А	ДТ
<i>Agrobacterium radiobacter</i>	3,61	0,21	8,52	0,21	А	ЦР
<i>Rhodococcus terrae</i>	0,41	0,09	4,93	7,67	А	УВО
<i>Actinomyces</i>	0,64	–	2,79	–		УВО
<i>Streptomyces</i>	–	–	7,67	0,59	А	ЦР, УВО
<i>Arthrobacter</i>	–	–	–	0,70	А	УВО, H ₂
<i>Nocardia carnea</i>	0,22	0,16	9,03	1,89	А	УВО, H ₂
<i>Mycobacterium</i>	0,68	1,25	13,19	–	А	УВО, АМ
<i>Micrococcus</i>	0,01	0,00	22,69	0,91	А	УВО, АМ
<i>Xanthomonas</i>	0,08	0,05	1,25	0,87	А	H ₂ , азотфиксация
<i>Hydrogenophaga</i>	–	1,25	–	0,33	А	H ₂
<i>Methylococcus</i>	–	0,19	–	5,83	А	Окисление CH ₄
<i>Nitrobacter</i>	–	0,40	–	0,90	А	ХЛА, нитрификатор
<i>Pseudomonas</i>	0,11	1,57	1,61	–	А/ФАН	ЦР, УВО, H ₂ ,
<i>P. vesicularis</i>	0,08	–	0,66	–	А/ФАН	ЦР, УВО, H ₂ ,
<i>P. cepacia</i>	0,02	2,55	1,13	4,82	А/ФАН	ЦР, УВО, H ₂ ,
<i>Flexibacter/</i> <i>Cytophaga</i>	0,06	0,09	2,04	1,56	А/ФАН	ЦР, ОП
<i>Bacillus</i>	1,19	1,75	17,92	3,59	А/ФАН	ЦР, УВО, H ₂
<i>B. subtilis</i>	0,61	1,19	8,73	1,78	А/ФАН	ЦР, УВО, H ₂
<i>Azospirillum</i>	0,01	0,01	2,89	0,13	А/ФАН	ФАА
<i>Spirochaeta</i> sp.	0,46	0,41	15,86	3,50	А/ФАН	ОУ
<i>Cellulomonas</i>	0,13	–	0,39	–	ФАН	ЦР, УВО
<i>Enterobacteriaceae</i>	7,11	1,95	70,87	–	ФАН	ОУ, ОП
<i>Propionibacterium</i> <i>freudenreichii</i>	–	0,44	53,73	3,86	ФАН	АнБр
<i>Bacteroides</i>	0,20	0,29	6,94	5,02	МАФ	АЦР
<i>Butyrivibrio</i>	1,47	1,15	80,58	18,51	АН	АнЦР, БР
<i>Clostridium</i>	6,39	–	101,47	–	АН	АнБр
<i>Cl. propionicum</i>	1,26	1,97	60,43	–	АН	АнБр
<i>Cl. pasterianum</i>	3,08	0,03	48,32	0,39	АН	АнБр
<i>Acetobacterium</i>	4,43	0,04	12,21	0,45	АН	H ₂ , АЦ
<i>Desulfobacter</i>	–	1,43	–	0,70	ВАН	СРБ
<i>Desulfotomaculum</i>	–	0,01	–	2,25	ВАН	СРБ
<i>Desulfovibrio</i>	0,48	0,52	6,69	1,42	ВАН	СРБ
FeRB Lovley	0,53	1,31	30,56	3,78	ВАН	ЖВБ
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	–	0,08	–	0,11	ВАН	ЖВБ
FeRed КМ (Лебедева)	–	0,09	–	1,23	ВАН	ЖВБ
FeRed (Турова, 1996)	0,04	1,17	0,90	0,06	ВАН	ЖВБ
Суммарная численность	33,39	21,8	600,38	73,7	–	–

Примечание: O₂ – отношение организма к кислороду: А – аэроб, ФАН – факультативные анаэробы, МАФ – микроаэрофилы, АН – анаэробы, ВАН – вторичные анаэробы. Функция, выполняемая в сообществе: ДТ – диссипотроф, ЦР – разложение целлюлозы, УВО – углеводородоокисляющие, H₂ – окисление водорода, АМ – аммонификатор, ХЛА – хемолитоавтотроф, ОП – разложение органических полимеров, ФАА – факультативно-анаэробная азотфиксация, ОУ – окисление углеводов, АЦР – анаэробное разложение целлюлозы, АнБр – анаэробное брожение, АЦ – ацетогенез, СРБ – анаэробная сульфатредукция, ЖВБ – анаэробное железовосстановление. * – оз. Золотенка, ** – оз. Бездонное

В сообществе микроорганизмов из мелкопесчанистого железистого ила оз. Золотенка преобладали 4-ре таксона: аэробный целлюлозолитик *Agrobacterium radiobacter*, представители сем. *Enterobacteriaceae*, окисляющие ряд промежуточных продуктов распада органического вещества (углеводы, спирты, аминокислоты и др.), анаэробные бродильщики р. *Clostridium* и бактерии р. *Acetobacterium*, осуществляющие анаэробный ацетогенез. В сообществе массово представлены углеводородокисляющие *Actinomyces* и *Mycobacterium*, анаэробы бродильщики р. *Butyrivibrio*, сульфатредукторы р. *Desulfovibrio*, железоредуктор FeRB Lovley.

В тонкодисперсном иле оз. Бездонное, обогащенном растительным детритом, наибольшего развития получили 19-ть таксонов разнообразных функциональных групп (табл. 2). Микроаэробные условия, высокое содержание органического вещества и фосфора в иле (тал. 1) создали благоприятные условия для массового развития аэробных, факультативно-аэробных, факультативно-анаэробных и анаэробных бактерий на разных этапах деструкции органического вещества. Высоких численностей достигли аэробы, среди которых диссипотрофный организм р. *Caulobacter*, целлюлозоразлагающие, углеводород-, водородокисляющие и аммонифицирующие организмы pp. *Actinomyces*, *Agrobacterium radiobacter*, *Rhodococcus terrae*, *Nocardia carnea*, бактерии pp. *Streptomyces*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*. Очень активны группы бактерий, осуществляющие в восстановительных условиях разложение целлюлозы, органических полимеров, азотфиксацию, окисление углеводов, водорода. Наиболее многочисленные из них представлены родами *Flexibacter*, *Cytophaga*, *Bacillus*, *Azospirillum*, углеводородокисляющим организмом *Spirochaeta* sp. В иле оз. Бездонное органический комплекс формировался в основном из соединений растительного происхождения, содержащих простые и сложные углеводы. Поэтому создавались благоприятные условия для активной жизнедеятельности вторичных анаэробов – бродильных бактерий, доминирующих в накопительной культуре – pp. *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Propionibacterium freudenreichii*, ацетогенов *Acetobacterium*. Окисление конечных продуктов распада органической материи осуществляли вторичные анаэробы – бактерии, способные к анаэробному дыханию с использованием в качестве конечных акцепторов электронов сульфаты, трехвалентное железо. Из этой функциональной группы следует отметить сульфатредукторов р. *Desulfovibrio*, железоредукторов FeRB Lovley и FeRed (табл. 2).

Fe(III) восстанавливающие бактерии, окисляющие водород. Накопительная культура железовосстанавливающих бактерий, окисляющих водород, получена из ила озера Золотенка. Водород, наряду с сероводородом и метаном, является конечным продуктом анаэробной деструкции органического вещества. Воды кислых гумифицированных озер, к которым относится оз. Золотенка, богаты водородом. Повышенная его концентрация ингибирует рост ряда физиологических групп бактерий, поэтому численность всех бактерий в сообществе минимальна (табл. 2).

В водородокисляющей накопительной культуре наиболее многочисленно развивались организмы, окисляющие водород – *Pseudomonas ceracia*, *Nocardia carnea*, р. *Bacillus*, *Hydrogenophaga*. а также *Mycobacterium*, способный осуществлять окисление углеводов и аммонификацию.

Кислые условия среды, недостаточное количество органического вещества угнетали развитие большинства бродильных и других групп бактерий. Из анаэробных бродильщиков наиболее приспособились к условиям ила р. *Butyrivibrio* и *Clostridium propionicum*, *Propionibacterium freudenreichii*, а также семейство *Enterobacteriaceae*, включающее организмы широкого спектра функционирования. Бродильщики в процессе ферментации выделяют H_2 , CO_2 , жирные кислоты, тем самым создают благоприятные условия для развития сульфатредуцирующих бактерий и бактерий цикла метана [15]. В сообществе развитие получили сульфатредукторы pp. *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum* и *Desulfovibrio*, из которых *Desulfobacter* был наиболее многочисленный. В кислых илах гумифицированных озер, где много водорода, развивается процесс анаэробного окисления метана с Fe(III) редукцией, что характеризует генерацию метана из водорода [3]. Поэтому в железистом иле оз. Золотенка увеличивают свою численность метанотрофные бактерии р. *Methylococcus*. Железовосстанавливающие бактерии *Geobacter sulfurreducens*, FeRB Lovley, FeRedKM и FeRed здесь также наиболее многочисленны по сравнению с другими накопительными культурами. Анаэробные условия в иле с минимальным значением редокс-потенциала способствуют активизации деятельности анаэробных сульфатредукторов и железоредукторов.

Fe(III) восстанавливающие бактерии, окисляющие метан. При исследовании активности бактерий в накопительных культурах, было заключено, что в оз. Бездонное присутствуют в илах наряду с многоуглеродной органикой продукты ферментации – аминокислоты, лактат, ацетат, метанол [3], что характеризует функциональное разнообразие микробного сообщества этого биотопа. Растительный детрит ила способствовал значительному преобладанию по численности в метанокисляющем сообществе бактерий р. *Butyrivibrio*, которые кроме брожения активно осуществляют анаэробное разложение целлюлозы. Организмы р. *Methylococcus* достигают достаточно высокой численности. Из аэробов преимущество получили организмы, окисляющие углеводороды и водо-

род – *Rhodococcus terrae*, *P. cepacia*, *Nocardia carnea*. Среди анаэробных бродильщиков следует отметить р. *Bacteroides* и *Propionibacterium freudenreichii*.

В водных экосистемах метаногенез и сульфатредукция являются конкурирующими процессами анаэробного распада органического вещества [3]. В настоящее время уже установлено, что в донном сообществе, осуществляющем окисление метана, могут доминировать и сульфатредукторы [3, 22]. В сообществе растительного ила максимально разнообразно представлены сульфатредуцирующие бактерии рр. *Desulfotomaculum*, *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*. В группе железовосстанавливающих организмов наиболее многочисленны FeRB Lovley и FeRed KM, при этом железоредукторы *Geobacter sulfurreducens* и FeRed имеют минимальную численность.

Структурообразующий комплекс Fe(III) восстанавливающих бактерий. Сопоставительным анализом установлена взаимосвязь функциональных характеристик и структуры микробного сообщества от типа донных осадков. Исследования, проведенные ранее в накопительных культурах, показали, что бактериобентосное сообщество тонко реагирует на изменение органической компоненты среды. Откликом сообщества является степень развития соответствующих введенным субстратам физиологических групп бактерий [11]. В накопительных культурах возникает острая конкуренция за пищевые субстраты, при этом доминируют те виды, которые приспосабливаются к условиям среды, обеспечивая наибольший рост численности.

Нами выявлены микроорганизмы, занимающие ведущие позиции в Fe(III) редукции в накопительных культурах (рис. 2). Структурообразующий комплекс, включающий доминантные и субдоминантные виды, формирующийся в разнотипных озерных илах, наглядно отражает специфику условий обитания. Также в равнозначных условиях обитания, разные источники субстратов-доноров приводят к смене доминантных таксонов в бактериобентосных сообществах.

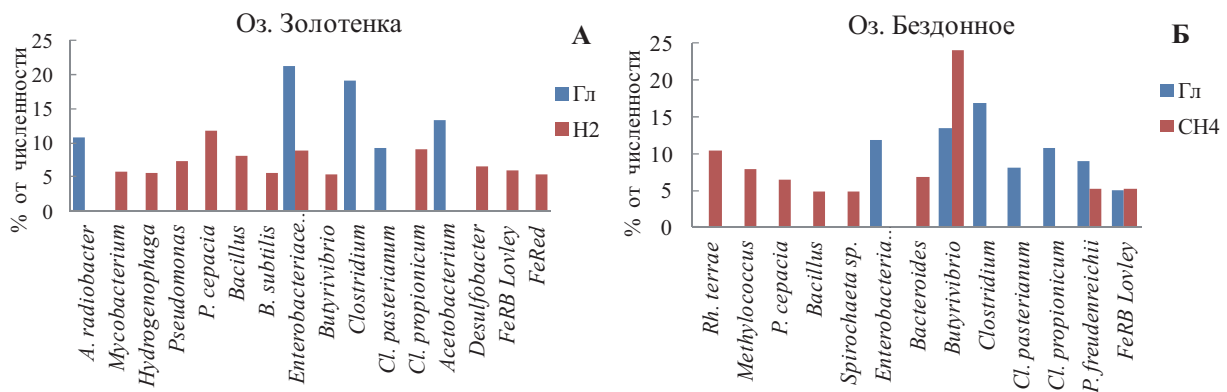


Рис. 2. Структурообразующие железовосстанавливающие бактерии, окисляющие глюкозу (Гл), водород (H₂) и метан (CH₄) в разнотипных илах озер Самарской Луки

Структурообразующий комплекс бактериального сообщества мелкопесчанистого железистого ила оз. Золотенка, окисляющих глюкозу, включает четыре таксона: *Agrobacterium radiobacter*, представители сем. *Enterobacteriaceae* и рр. *Clostridium*, *Acetobacterium*, доля которых в общей численности бактерий составляла 13–21% (рис. 2А). Введение водорода в газовую фазу накопительной культуры стимулировало активный рост группы водородных бактерий (6–8%) р. *Hydrogenophaga*, псевдомонад рр. *Pseudomonas* с абсолютным доминантом *P. cepacia* (12%). Структурообразующий комплекс обогатили сульфатвосстанавливающие бактерии р. *Desulfobacter*, два железоредуктора FeRB Lovley и FeRed, сем. *Enterobacteriaceae*, составляющие в сообществе 5–9%. Из бродильных бактерий наибольшей численностью обладали субдоминанты *Cl. propionicum* и р. *Butyrivibrio*, толерантных к кислым условиям среды, из углеводородокисляющих – рр. *Mycobacterium*, *Bacillus* (6–8%).

В структурообразующем комплексе бактериального сообщества тонкодисперсного растительно-го ила оз. Бездонное, окисляющего глюкозу, доминировали бродильщики рр. *Butyrivibrio*, *Clostridium* и *Cl. propionicum*. Широко были представлены субдоминанты *Cl. pasterianum*, *Propionibacterium freudenreichii* и железоредуктор FeRB Lovley.

Fe(III) восстанавливающие накопительные культуры метаноокисляющих бактерий характеризовалось значительным преобладанием целлюлолитика *Rhodococcus terrae* (10%) и бродильщиков р. *Butyrivibrio* (25%). Активно развивался метанотроф р. *Methylococcus*, достигая в сообществе 8%. Из активных субдоминант следует также отметить *P. cepacia*, р. *Bacillus*, *Spirochaeta sp.*, *Pr. freudenreichii*, *Bacteroides* (6–7%).

Вклад второстепенных и минорных родов и видов в накопительных культурах бактерий варьировал от 0,01% до 4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании ГХ-МС анализа в накопительных культурах Fe(III) восстанавливающих бактерий, окисляющих глюкозу, водород и метан в анаэробных условиях, выявлено 38 таксонов домена *Bacteria*, принадлежащих филумам *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroides*, *Spirochaetes*. Основу структурообразующих комплексов бактериальных сообществ, осуществляющих Fe(III) редукцию составляли 4–10 доминант и субдоминант различных функциональных групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пиневиц А.В. Микробиология железа и марганца. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2005. 374 с.
2. Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: ПринтХаус, 2010. 192 с.
3. Потехина Ж.С. Метаболизм Fe(III) восстанавливающих бактерий. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2006. 225 с.
4. Ривкина Е.М., Федоров-Давыдов Д.Г., Захарюк А.Г., Щербакова В.А., Вишневская Т.А. Свободное железо и железовосстанавливающие микроорганизмы в почвах и многолетнемерзлых отложениях северо-востока Сибири // Почвоведение, 2020. № 10. С. 1247–1261.
5. Солдатова Е.А., Сидкина Е.С., Кирюхин Б.А., Максимов П.Н., Кривенко Л.А., Иванов В., Тананаев Н.И. Геохимические условия источника межмерзлотных вод Суллар: вторичное минералообразование и потоки метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2023. Т. 334. №10, С. 16–33.
6. Pavlova O.N., Izosimova O.N., Chernitsyna S.M., Bukin S.V., Ivanov V.G., Khabuyev A.V., Pogodaeva T.V., Smirnova D.K., Gorshkov A.G., Zemskaya T.I. Comparative characterization of anaerobic oil oxidation processes by microbial communities of sediments from natural oil seeps in Lake Baikal (Gorevoy Utes, Bolshaya Zelenovskaya) // Limnology and Freshwater Biology, 2024. №4. С. 1035–1049.
7. Потехина Ж.С., Шерышева Н.Г., Бычек-Гуцина И.А., Готтшалк Г. Анаэробный рост бактерий на метане с Fe(III) восстановлением, как электронно-акцептирующим процессом // Изв. СамНЦ РАН, 2000. Т. 2. № 2. С. 371–379.
8. Lovley D.R. Organic matter mineralization with the reduction of ferric iron // Geomicrob. J., 1987. V. 5. № 314. P. 375–399.
9. Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments // Appl. Environ. Microbiol., 1986. V. 51. P. 683–689.
10. Lonergan D.J., Jenter H., Coates J.D., Schmidt T., Lovley D.R. Phylogenetic analysis of dissimilatory Fe(III)-reducing bacteria // J. Bacteriol., 1996.
11. Потехина Ж.С. Биоразнообразие бактерий, участвующих в разложении органического вещества в донных осадках озер Самарской Луки // Биологические ресурсы и биологическое разнообразие Самарского Поволжья. Т.1. Животные. Тольятти, 2005. С. 35–59.
12. Sherysheva N.G., Osipov G.A., Khalko V.V. Studying composition of bacteriobenthic communities in the sediments of water ecosystems by fatty acid markers // J. Inland Water Biology, 2015. 8(3). P. 242–249.
13. Жариков В.В., Горбунов М.Ю., Быкова С.В., Уманская М.В., Шерышева Н.Г. Экология сообществ бактерий и свободноживущих инфузорий малых водоемов Самарской Луки // Под ред. д.б.н. В.В. Жарикова. Тольятти: ИЭВБ РАН. 2007. 193 с.
14. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 194 с.
15. Дзюбан А.Н. Численность некоторых видов маслянокислых бактерий в грунтах волжских водохранилищ и озер разного уровня трофии в зависимости от содержания органических веществ // Труды ИБВВ РАН, 1993. Вып. 66. С. 47–64.
16. Daniel R., Warnecke F., Potekhina J.S., Gottschalk G. Identification of the syntrophic partners in a coculture coupling anaerobic methanol oxidation to Fe(III) reduction // FEMS Microbiol. Lett., 1999. V. 180. P. 197–203.
17. Верховцева Н.В., Осипов Г.А. Метод газовой хроматографии-масс-спектрометрии в изучении микробных сообществ почв агроценоза // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 51–54.
18. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. Т.1: пер. с англ./Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крита, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса М.: Мир, 1997. 432 с.
19. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. Т.2: пер. с англ./Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крита, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса М.: Мир, 1997. 368 с.
20. Баканов А.И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах / Экологический мониторинг. Методы биологического и физико-химического мониторинга. Часть VI: Учебное пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. С. 61–116.
21. Дмитриева А.И., Фасхутдинова Е.Р., Дроздова М.Ю., Проскуракова Л.А. Филогенетическое разнообразие микроорганизмов источника Абаканский Аржан-потенциальных продуцентов микробной энергии // Техника и технология пищевых производств, 2022. Т. 52. №3, С. 458–468.
22. Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию: Учебное пособие М.: Книжный дом «Университет», 2001. 256 с.

FUNCTIONAL GROUPS OF Fe(III)-REDUCING BACTERIA IN BOTTOM SEDIMENTS OF SAMARSKAYA LUKA LAKES

© 2025 N.G. Sherysheva

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia

Enrichment cultures of Fe(III)-reducing bacteria, which anaerobically oxidize glucose, hydrogen, and methane, were obtained from bottom sediments of different types of silts from lakes in Samarskaya Luka. 38 taxa of the *Bacteria* domain, belonging to 5 phyla: *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroides*, and *Spirochaetes*, were identified as part of the bacteriobenthic communities. The dominant taxa that carry out anaerobic Fe(III) reduction were determined. The influence of silt type, environmental pH, oxidation-reduction conditions, and the genesis of organic matter in silts on the formation of a structure-forming complex of bacterial communities was demonstrated. The community's response to the introduced substrates was a change in the composition of functional groups of bacteria. In the fine-sandy ferruginous silt from Zolotenka Lake, the Fe(III)-reducing microbial community that oxidizes glucose is widely represented by the dominant cellulolytics *Agrobacterium radiobacter*, fermenters of the genus *Clostridium*, acetogens of the genus *Acetobacterium*, and organisms of the family *Enterobacteriaceae*, which decompose organic polymers. The hydrogen-oxidizing community is widely developed by hydrogen bacteria of *Hydrogenophaga*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, anaerobic fermenters *Cl. propionicum*, sulfate reducers of the genus *Desulfobacter*, and a group of iron reducers *Geobacter sulfurreducens*, FeRB Lovley, and FeRedKM. In the fine plant silt from Bezdonnoye Lake, the structure-forming bacterial complex that oxidizes glucose in the process of Fe(III) reduction is represented by a variety of fermenters: *Butyrivibrio*, *Cl. pasterianum*, *Cl. propionicum*, *Propionibacterium freudenreichii*. Introduction of methane into the gas phase of the enrichment culture stimulated the development of methanotrophs of the genus *Methylococcus*, hydrogen-producing bacteria *Rhodococcus terrae*, and fermenters of the genus *Butyrivibrio*. Dissimilatory iron-reducing bacteria were most numerous in communities of bacteria oxidizing hydrogen and methane. The taxonomic composition of bacteriobenthic communities was determined by gas chromatography-mass spectrometry of microbial markers.

Keywords: taxonomic composition, enrichment cultures, Fe(III)-reducing bacteria, structure-forming complex, type of bottom sediments, environmental conditions, glucose, hydrogen, methane

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-404-412

EDN: SEFURS

REFERENCES

1. Pinevich A.V. Mikrobiologiya zheleza i margantsa. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2005. 374 s.
2. Dzyuban A.N. Destruktsiya organicheskogo veshchestva i tsikl metana v donnykh otlozheniyakh vnutrennikh vodoyemov. Yaroslavl': PrintKhaus, 2010. 192 s.
3. Potekhina ZH.S. Metabolizm Fe(III) vosstanavlivayushchikh bakteriy. Tol'yatti.: IEVB RAN, 2006. 225 s.
4. Rivkina Ye.M., Fedorov-Davydov D.G., Zakharyuk A.G., Shcherbakova V.A., Vishnivetskaya T.A. Svobodnoye zhelezo i zhelezovosstanavlivayushchiye mikroorganizmy v pochvakh i mnogoletnemerzlykh otlozheniyakh severo-vostoka Sibiri // Pochvovedeniye, 2020. № 10. S. 1247–1261.
5. Soldatova Ye.A., Sidkina Ye.S., Kiryukhin B.A., Maksimov P.N., Krivenok L.A., Ivanov V., Tananayev N.I. Geokhimicheskiye usloviya istochnika mezhmerzlotnykh vod sullar: vtorychnoye mineraloobrazovaniye i potoki metana // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, 2023. T. 334. №10, S.16–33.
6. Pavlova O.N., Izosimova O.N., Chernitsyna S.M., Bukin S.V., Ivanov V.G., Khabuyev A.V., Pogodaeva T.V., Smirnova D.K., Gorshkov A.G., Zemskaya T.I. Comparative characterization of anaerobic oil oxidation processes by microbial communities of sediments from natural oil seeps in Lake Baikal (Gorevoy Utes, Bolshaya Zelenovskaya) // Limnology and Freshwater Biology, 2024. №4. S. 1035–1049.
7. Potekhina ZH.S., Sherysheva N.G., Bychek-Gushchina I.A., Gottshalk G. Anaerobnyy rost bakteriy na metane s Fe(III) vosstanovleniyem, kak elektronno-akseptiruyushchim protsessom // Izv. SamNTS RAN, 2000. T. 2. № 2. S. 371–379.
8. Lovley D.R. Organic matter mineralization with the reduction of ferric iron // Geomicrob. J., 1987. V. 5. № 314. P. 375–399.
9. Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments // Appl. Environ. Microbiol., 1986. V. 51. P. 683–689.
10. Lonergan D.J., Jenter H., Coates J.D., Schmidt T., Lovley D.R. Phylogenetic analysis of dissimilatory Fe(III)-reducing bacteria // J. Bacteriol., 1996.
11. Potekhina ZH.S. Bioraznoobrazie bakteriy, uchastvuyushchikh v razlozhenii organicheskogo veshchestva v donnykh osadkakh ozer Samarskoy Luki // Biologicheskoye resursy i biologicheskoye raznoobrazie Samarskogo Povolzh'ya. T.1. Zhivotnyye. Tol'yatti, 2005. S. 35–59.
12. Sherysheva N.G., Osipov G.A., Khalko V.V. Studying composition of bacteriobenthic communities in the sediments of water ecosystems by fatty acid markers // J. Inland Water Biology, 2015. 8(3). R. 242–249.
13. Zharikov V.V., Gorbunov M.YU., Bykova S.V., Umanskaya M.V., Sherysheva. N.G. Ekologiya soobshchestv bakteriy i

- svobodnozhivushchikh infuzoriy malykh vodoyemov Samarskoy Luki // Pod red. d.b.n. V.V. Zharikova. Tol'yatti: IEVB RAN. 2007. 193 s.
14. *Romanenko V.I.* Mikrobiologicheskiye protsessy produktsii i destrukttsii organicheskogo veshchestva vo vnutrennikh vodoyemakh. L.: Nauka, 1985. 194 s.
 15. *Dzyuban A.N.* Chislennost' nekotorykh vidov maslyanokislykh bakteriy v gruntakh volzhskikh vodokhranilishch i ozer raznogo urovnya trofii v zavisimosti ot sodержaniya organicheskikh veshchestv // Trudy IBVV RAN, 1993. Vyp. 66. S. 47–64.
 16. *Daniel R., Warnecke F., Potekhina J.S. Gottschalk G.* Identification of the syntrophic partners in a coculture coupling anaerobic methanol oxidation to Fe(III) reduction // FEMS Microbiol. Lett., 1999. V. 180. P. 197–203.
 17. *Verkhovtseva N.V., Osipov G.A.* Metod gazovoy khromatografii-mass-spektrometrii v izuchenii mikrobnnykh soobshchestv pochv agrotsenoza // Problemy agrokhimii i ekologii. 2008. № 1. S. 51–54.
 18. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii.* V 2-kh t. T.1: per. s ang./Pod red. Dzh. Khoulta, N. Krita, P. Snita, Dzh. Steyli, S. Uil'yamsa M.: Mir, 1997. 432 s.
 19. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii.* V 2-kh t. T.2: per. s ang./Pod red. Dzh. Khoulta, N. Krita, P. Snita, Dzh. Steyli, S. Uil'yamsa M.: Mir, 1997. 368 s.
 20. *Bakanov A.I.* Kolichestvennaya otsenka dominirovaniya v ekologicheskikh soobshchestvakh / Ekologicheskiiy monitoring. Metody biologicheskogo i fiziko-khimicheskogo monitoringa. Chast' VI: Uchebnoye posobiye. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2006. S. 61–116.
 21. *Dmitriyeva A.I., Faskhutdinova Ye.R., Drozdova M.YU., Proskuryakova L.A.* Filogeneticheskoye raznoobraziye mikroorganizmov istochnika Abakanskiy Arzhan-potentsial'nykh produtsentov mikrobnoy energii // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv, 2022. T. 52. №3, S. 458–468.
 22. *Zavarzin G.A., Kolotilova N.N.* Vvedeniye v prirodovedcheskuyu mikrobiologiyu: Uchebnoye posobiye M.: Knizhnyy dom «Universitet», 2001. 256 s.