

УДК 576.852.1

FE(III) РЕДУЦИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ, ОКИСЛЯЮЩИЕ АЦЕТАТ И ВОДОРОД В ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕР НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА “САМАРСКАЯ ЛУКА”

© 2005 Ж.С. Потехина

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Исследования накопительных культур микроорганизмов бентосных сообществ озер Национального Парка “Самарская Лука” установили, что редукция Fe(III) в процессах окисления водорода и ацетата является наиболее общей, универсальной, интегрирующей оценкой аэробной и анаэробной деструкции органического вещества микробными сообществами экосистем. Активность Fe(III) редуцирующих микроорганизмов в донных осадках зависит от совокупного влияния множества параметров местообитания. Определены экологические факторы, контролирующие развитие ацетатоокисляющих и водородоокисляющих Fe(III) редуцентов.

Известно, что водород и ацетат накапливаются в озерных илах в процессе деструкции органического вещества и являются основными субстратами вторичных анаэробов. Развитие основных физиологических групп вторичных анаэробов – Fe(III) редуцентов, метангенерирующих и сульфатредуцирующих бактерий осуществляется после удаления растворенного кислорода, восстановления нитратов и аккумуляции Mn (II) микроорганизмами сообщества. В разложении органического вещества Fe(III) восстановление предшествует сульфатредукции и метангенерации. Особенностью Fe(III), как акцептора электронов, является то, что он превалирует в водных экосистемах и основная часть Fe(III) в осадках находится в твердой нерастворенной форме. В донных осадках водных систем Fe(III) содержится в форме оксидов – гетита, лимонита, гематита, магнетита; гидроокисей – ферригидрита, аморфных оксигидроксидов, акаденита, лепидохрозита; в соединениях оксидов железа с кремнием и глиной (сметит), в соединениях с Ca^{2+} и CO_3^{2-} в форме железистого кальцита. Микроорганизмы способны восстанавливать и переводить нерастворимые соединения Fe(III) в растворенное состояние. Благодаря этому Fe(III) редуцирующие микроорганизмы конкурентоспособны за органические вещества осадков, поскольку процесс не лимитируется кислородом, нитратредукцией, сульфатредукцией и метаногенезом

которые все без исключения используют только растворенные акцепторы электронов (O_2 , NO_2 , SO_4 , CO_2). Интенсивность микробной редукции возрастает с уменьшением степени кристаллизации Fe(III) соединений. Кроме того, Fe(III) редуценты используют растворенные формы Fe(III) в соединениях с хлором, цитратом, фосфатом и комплексах с хелатами и гуматами.

При восстановлении определенных форм Fe(III) соединений выделяется значительно больше энергии, чем в процессах сульфатредукции и метаногенеза. Fe(III) редуцирующие бактерии конкурентоспособны за окисляемые субстраты и доминируют в Fe(III) содержащих экосистемах при наличии других акцепторов электронов, так как снижают пулы водорода и ацетата до концентраций, при которых не могут развиваться сульфатредукторы и метаногены. Поэтому, как было установлено работами Лавли и Филлипса [1, 2], процесс Fe(III) восстановления подавляет сульфатредукцию и метаногенез и является доминирующим в илах многих озер, рек и затопляемых почв.

В экосистемах со слабым круговоротом железа после исчерпания биологически восстанавливаемого трехвалентного железа микроорганизмы сообщества, окисляя органику, переключаются на другие акцепторы, такие как сульфат и CO_2 . Процессы сульфатредукция и метаногенез обычно развиваются в более глубоких

слоях донных осадков с низкими потенциалами. Поэтому осуществляемые вторичными анаэробами процессы Fe(III) редукции, метаногенеза и сульфатредукции разделены в экосистемах в пространстве и времени.

Способные к Fe(III) восстановлению бактерии занимают определенные экологические ниши в экосистемах. Кроме поверхностных слоев донных осадков Fe(III) редукция осуществляется в гипolimнионе стратифицированных озер. Жизнедеятельность бактерий определяется наличием и концентрацией восстанавливаемых биологически соединений трехвалентного железа и пулами окисляемых субстратов – водорода и ацетата. В свою очередь концентрации H_2 и ацетата формируются в зависимости от структуры и функционирования всего сообщества экосистемы. Концентрации конечных продуктов зависят от количества и структуры органического вещества в экосистеме и интенсивности его метаболизма. Так как осуществляющие Fe(III) редукцию микроорганизмы являются конкурентоспособными за общие субстраты водород и ацетат, редукция Fe(III) в накопительных культурах водород- и ацетатоокисляющих микроорганизмов из донных отложений является отражением процессов деструкции органического вещества в илах.

Fe(III) акцептор электронов вступит в окислительные реакции при исчерпании кислорода [3], поэтому сумма Fe(III) редукции с ацетатом и Fe(III) редукции с водородом в илах является результирующей всех предшествующих окислительно-восстановительных процессов, посредством которых разлагалось органическое вещество в экосистеме.

Подтверждением этого заключения является установленная в наших исследованиях накопительных культур корреляция средней Fe(III) редукции на субстратах разной степени окисленности, включая сложные многоуглеродные вещества – глюкозу, белки и аминокислоты, продукты ферментации – цитрат, лактат, и конечные продукты метаболизма – H_2 , ацетат, CH_4 с Fe(III) редукцией на ацетате+водороде. Данные представлены на рис. 1.

Анаэробное окисление ацетата с Fe(III) редукцией

Ацетат – наиболее распространенный в природных осадках субстрат, используемый вторичными анаэробами, в том числе и Fe(III) редуцирующими бактериями.

Ацетат является одним из ключевых субстратов многочисленных метаболических путей деструкции органического вещества в экосистемах.

Суточные культуры илов стратифицированных озер Шелехметское, Подгорское и макрофитного мелководного озера Харовое окисляли ацетат с Fe(III) восстановлением наиболее активно (рис. 2). Это свидетельствует о ферментации в илах органического вещества до ацетата. Бактерии осадков из мелководных озер Лизинка, Серебрянка и озера Малое Карстовое менее активно разлагали ацетат в суточных культурах, и, наконец, бактерии озер Клюквенное, Золотенка, Бездонное и Ужиное слабо метаболизировали ацетат с Fe(III) восстановлением.

Дальнейшее культивирование в накопительных культурах привело к усилению активности Fe(III) восстанавливающих микро-

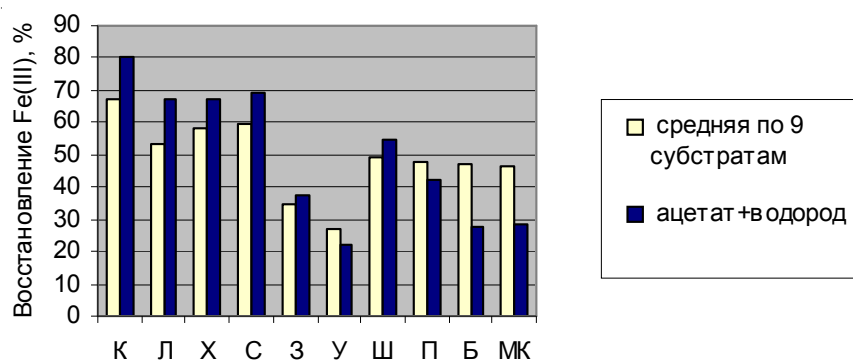


Рис. 1. Корреляция среднего суммарного Fe(III) восстановления на 9 различных субстратах с Fe(III) редукцией на ацетате + водороде:

К – Клюквенное; Л – Лизинка; Х – Харовое; С – Серебрянка; З – Золотенка; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое

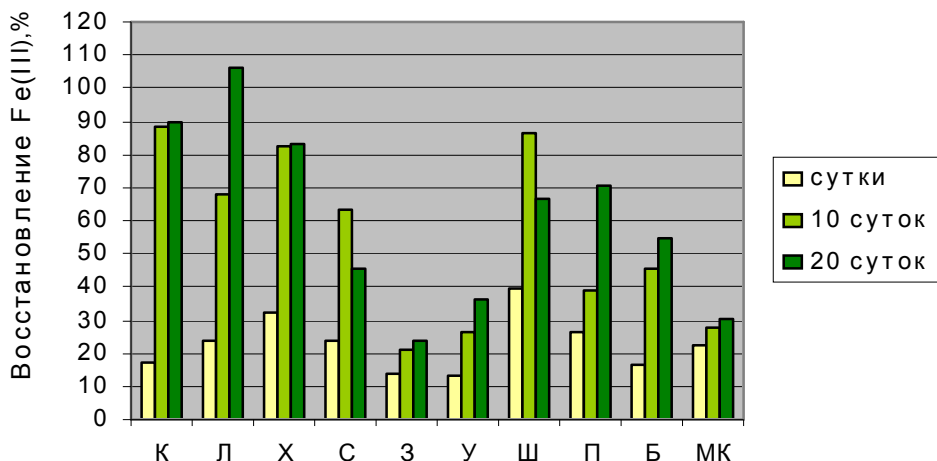


Рис. 2. Динамика восстановления пирофосфата железа при окислении ацетата: К – Клюквенное; Л - Лизинка; Х – Харовое; С – Серебрянка; З – Золотенка; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое

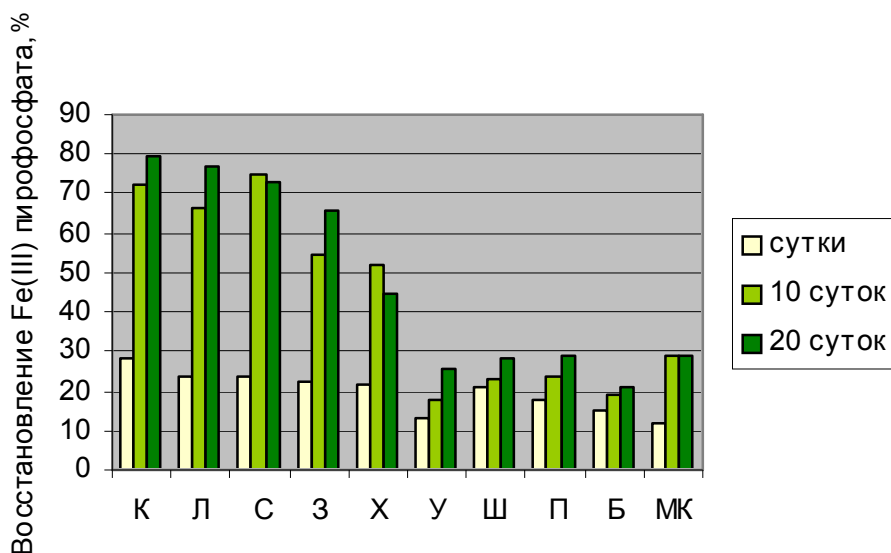


Рис. 3. Динамика восстановления пирофосфата железа при окислении водорода: К – Клюквенное; Л - Лизинка; С – Серебрянка; З – Золотенка; Х – Харовое; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое

организмов из сообществ донных осадков озер мелководных озер Лизинка, Клюквенное, и евтрофных – Шелехметское, Подгорское, Харовое и Бездонное (рис. 2), где восстановилось значительно больше трехвалентного железа, чем в суточных культурах. В результате оттока электронов на Fe(III) акцептор активировался метаболизм ацетата. К разложению ацетата быстро адаптировались бактерии сообществ донных осадков озер Шелехметское, Харовое, Клюквенное и Лизинка. Ацетат не является субстратом Fe(III) редуцентов из озерных илов Золотенки и Малого Карстового. Бактерии, выделенные в накопительные культуры из озер Серебрянка и Ужиное слабо разлагают ацетат.

Fe (III) восстанавливающие бактерии

сем. *Geobacteriaceae* [4, 5] окисляют ацетат с Fe(III) редуцией и могут быть важной группой в илах озер Шелехметское, Подгорское, Бездонное, Харовое, Лизинка, Клюквенное.

Анаэробное окисление водорода с Fe(III) редуцией

Данные, полученные при изучении процесса редуции пирофосфата железа при окислении водорода в накопительных культурах озерных илов, являются доказательством важности этого метаболизма в мелководных гумифицированных озерах Самарской Луки (рис. 3).

В суточных, 10 суточных и 20 суточных культурах редуция пирофосфата железа с водородом осуществлялась наиболее интенсив-

но в илах озер с окрашенной водой - Лизинка, Клювенное, Золотенка и Серебрянка, содержащих гумус различного происхождения. Окисление водорода с Fe(III) редуциацией протекает также в озерном или мелководном озере Харовое.

Эти результаты - показатель наличия водородоокисляющих бактерий в донных отложениях мелководных озер, способных к его окислению с передачей электронов на трехвалентное железо.

Особенности Fe(III) редуции в мелководных и стратифицированных озерах

Первая группа включает мелководные озера Юго-Западного и Центрального районов НП "Самарская Лука" - Лизинка, Клювенное, Серебрянка, Ужиное, Харовое а также исследованная прибрежная часть озера Золотенка.

Вторая группа включает подверженные летней стратификации озера Бездонное, Шелехметское, Малое Карстовое и Подгорское с глубиной от 2,5 до 5 метров.

Установлено, что процессы Fe(III) восстановления в мелководных (до 1,8 м) и подверженных стратификации водных масс более глубоких (2,5-8 м) осуществляются в озерных илах с разной интенсивностью и контролируются определенными экологическими факторами.

Озера различаются по многим параметрам, включая степень минерализации и цветность воды, способ накопления органического вещества, уровень продукции фито-

планктона и развития макрофитов, реакцию среды и т. д.

В то же время выявлены разные скорости Fe(III) редуцирующего процесса в отличающихся по цветности мелководных озерах, а также среди стратифицированных озер, обусловленные влиянием определенных абиотических факторов. Выделяются наиболее активные Fe(III) редуценты в сообществах мелководных озер Харовое, Клювенное, Лизинка, среди стратифицированных озер - сообщество озера Шелехметское.

Несмотря на эти различия, как следует из результатов, полученных в накопительных культурах, процессы Fe(III) редуции на ацетате и водороде в летнее время протекают в среднем более интенсивно в донных осадках мелководных озер (рис. 4).

Температура илов

Установлено, что одним из наиболее важных контролирующих факторов Fe(III) редуции является температура илов мелководных и более глубоководных озер.

В озерах с температурами илов 11-19°C ацетатоокисляющие бактерии доминируют над водородоокисляющими, при более высоких температурах существенно возрастает роль водородоокисляющих бактерий (рис. 5). В илах с низкой температурой и Eh происходит переключение трофического маршрута микробного сообщества, обусловленное сменой доминирующих групп микроорганизмов и развитием ацетогенеза в илах, что подтверждается исследованиями накопительных культур.

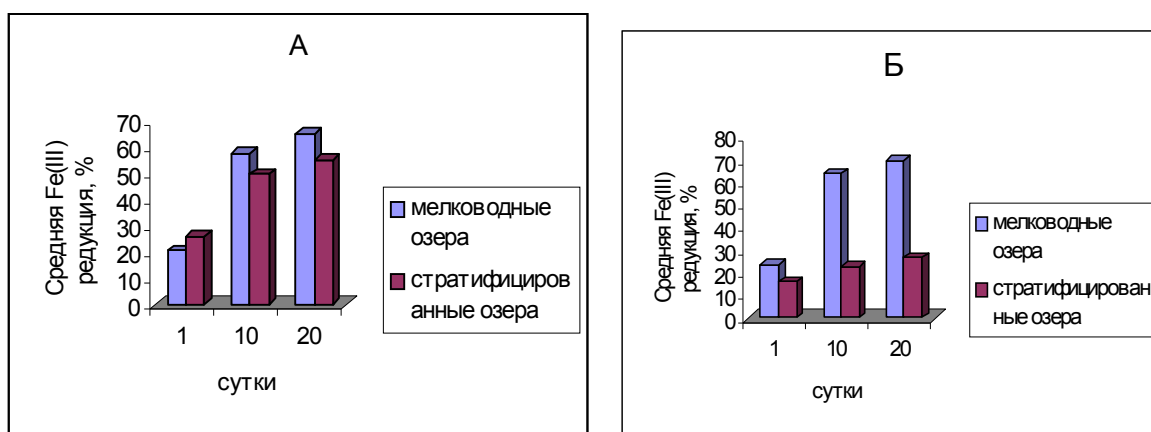


Рис. 4. Гистограмма Fe(III) редуции при окислении ацетата (А) и водорода (Б)

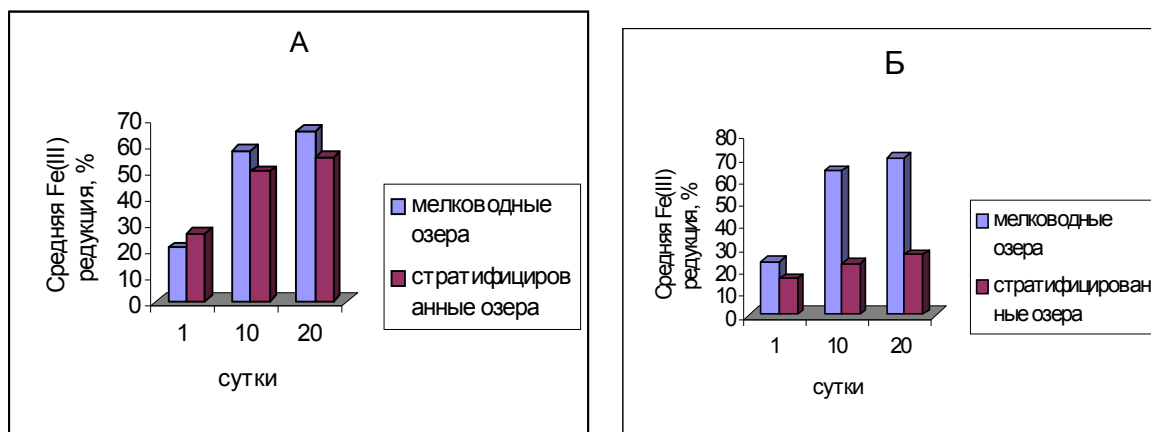


Рис. 5. Зависимость Fe(III) редуции на водороде и ацетате от температуры илов: МК – Малое Карстовое; Б – Бездонное; Ш – Шелехметское; У – Ужиное; Х – Харовое; П – Подгорское; К – Клюквенное; З – Золотенка; С – Серебрянка; Л - Лизинка

Минерализация воды

Озера отличаются различным солевым режимом. Степень минерализации воды определяет развитие разных групп хемоорганотрофов или хемолитотрофов среди Fe(III) редуцентов в сообществах. Так анаэробы, метаболизирующие широкий спектр субстратов, включая ацетат и водород, активны как в илах мелководных озер с низкой минерализацией воды - Лизинка, Серебрянка и Клюквенное так и в минерализованном озере Харовое. В озерах 2 группы Fe(III) редуценты более всего активны в озерах с минерализованной водой Шелехметское и Подгорское, и, напротив, мало активны в озерах с менее минерализованной водой озер Бездонное и Малое Карстовое. В то же время такой параметр, как

содержание гидрокарбонатов влияет на рН илов и является очень важным фактором, определяющим Fe(III) редуцию на ацетате.

РН илов

Fe(III) редуция с окислением конечных продуктов метаболизма органических веществ зависела от рН илов. Было установлено экспериментально, что доминирование ацетат- или (и) водородокисляющих бактерий в озерных илах определяется рН.

РН 6,1-6,35 наиболее благоприятная реакция среды для Fe(III) редуции на ацетате и водороде (рис. 6).

Слабо кислые торфянистые прогреваемые илы озер Клюквенное и Лизинка отличались высокой активностью водород- и аце-

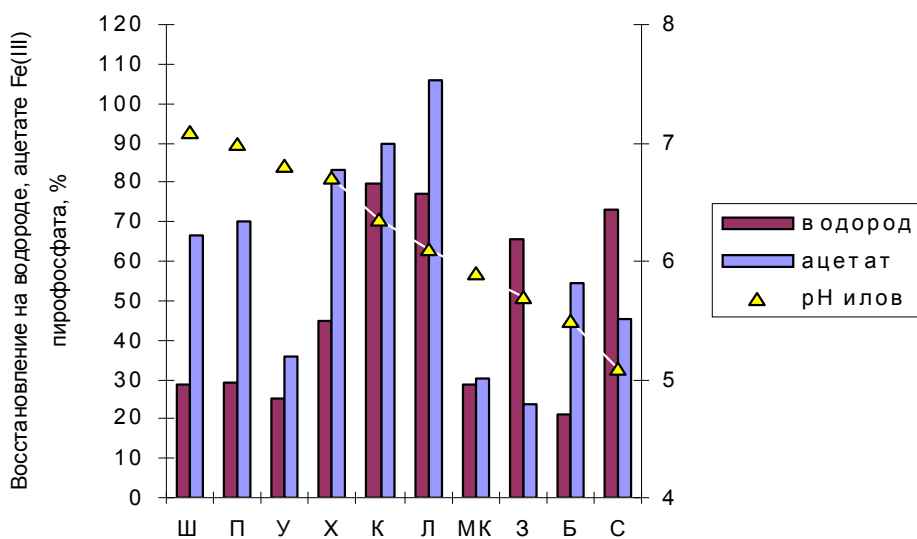


Рис. 6. Зависимость восстановления пирофосфата железа на ацетате и водороде от рН илов: Ш – Шелехметское; П – Подгорское; У – Ужиное; Х – Харовое; К – Клюквенное; Л – Лизинка; МК – Малое Карстовое; З – Золотенка; Б – Бездонное; С – Серебрянка

татокисляющих бактерий. В наиболее кислых прогреваемых илах озер Серебрянка и Золотенка преимущественна роль водородотрофов. В илах озер Харовое, Подгорское, Шелехметское, Ужиное и Бездонное присутствуют в большом количестве бикарбонаты, создающие естественную буферную систему, нейтрализующую водород, выделяющийся при разложении вещества. Следовательно, ионы HCO_3^- связывают выделяющийся H_2 , обеспечивая дальнейшее разложение органического вещества. В илах содержится ацетат, поэтому развиваются ацетатотрофы.

Предположение, что лимитирующим фактором окисления ацетата в экосистемах с кислым рН илов является низкое содержание в илах ионов HCO_3^- , было подтверждено экспериментом с культивированием микроорганизмов на ацетате совместно с NaHCO_3 .

С введением NaHCO_3 в среду существенно возросли скорости Fe(III) восстановления в накопительных культурах из кислых осадков озер Серебрянка, Малое Карстовое и Золотенка по-сравнению с культурами на ацетате без буфера (рис. 7).

Добавление гидрокарбоната в накопительные культуры группы озер с активной Fe(III) редукцией на ацетате - Харовое, Шелехметское, Бездонное, Подгорское, Лизинка и Ужиное (рис. 6) не повлияло существенно на Fe(III) редуцирующую активность микроорганизмов (рис. 7)

Следовательно, Fe(III) восстановление в осадках озер Серебрянка, Малое карстовое и

Золотенка лимитировано низким содержанием гидрокарбонатов, что приводит к накоплению водорода, ограничивающим процессы окисления органического вещества.

С рН илов связана концентрация растворенных форм железа в придонных слоях воды. В озерах с рН илов 5-6,5 определены максимальные значения растворенного железа в придонной воде, в илах с рН больше 7 содержится существенно меньше железа в воде (рис. 8).

В летнее время в придонных слоях озер регистрировалось увеличение содержания железа на фоне снижения концентрации кислорода, что является подтверждением усиления Fe(III) редуцирующих процессов в илах.

Eh придонной воды, Eh илов, содержание кислорода в придонной воде

Для мелководных экосистем в летнее время характерны довольно высокие значения Eh придонной воды с существенным падением в грунтах (рис.9). В 0-5см поверхностном слое донных отложений мелководных озер потенциалы положительные, и здесь могут развиваться Fe(III) восстанавливающие бактерии. В более глубоких слоях илов потенциалы существенно ниже и создаются условия, благоприятные для развития метангенерирующих и сульфатредуцирующих бактерий.

Озера с глубиной менее двух метров насыщены кислородом и в них осуществляются O_2 зависимые аэробные процессы окисле-

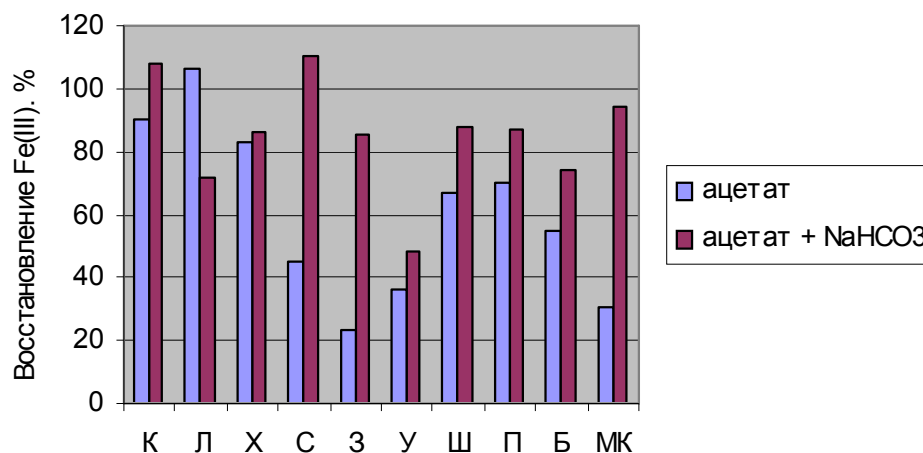


Рис. 7. Восстановление пирофосфата железа на ацетате; на ацетате с добавлением NaHCO_3 : К – Клюквенное; Л - Лизинка; Х – Харовое; С – Серебрянка; З – Золотенка; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое.

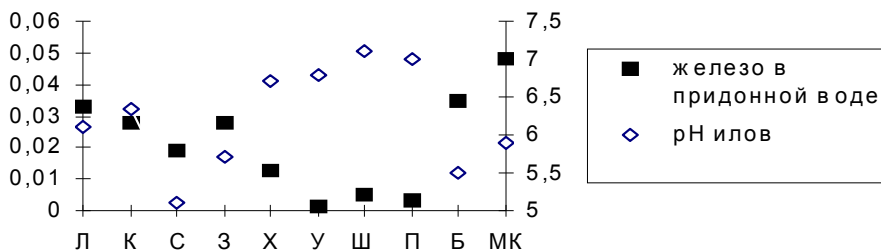


Рис. 8. Зависимость содержания железа в придонной воде от pH илов

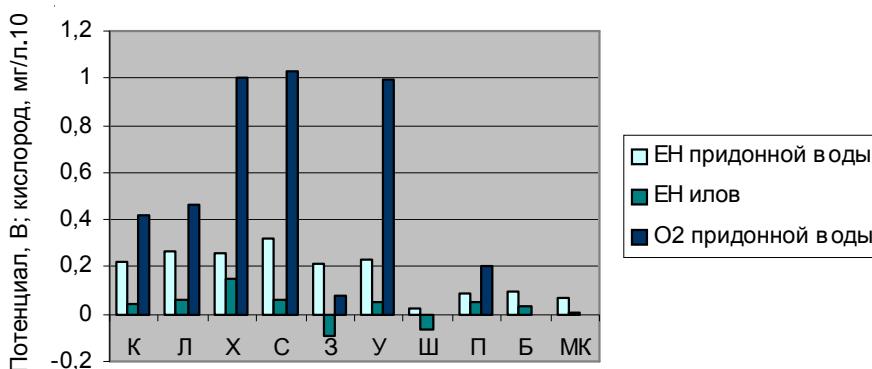


Рис. 9. Кислород придонной воды, потенциал придонной воды и илов изучаемых озер:

К – Клюквенное; Л - Лизинка; Х – Харовое; С – Серебрянка; З – Золотенка; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое

* в озере Золотенка параметры приведены для глубоководной части озера

ния органического вещества. При потреблении кислорода в процессе деструкции органического вещества в илах создаются микроаэрофильные и анаэробные зоны, в которых развиваются вторичные анаэробы, редуцирующие Fe(III) соединения.

В мелководных озерах идет интенсивный круговорот железа между осадками и придонной водой. Присутствующий в придонной воде кислород окисляет восстановленное железо до Fe(III), которое снова участвует в анаэробном дыхании бактерий в качестве акцептора электронов. Кислород является фактором, обеспечивающим пулом трехвалентного железа процесс Fe(III) восстановления сопряженный с окислением субстратов в донных осадках. В содержащих кислород водных слоях развиваются железобактерии, окисляющие восстановленное железо до Fe(III). Установлено, что в водных экосистемах биологическое окисление железа протекает со значительно более высокими скоростями, чем химическое. Железоокисляющие бактерии развиваются в аэробных и микроаэрофильных условиях. Кроме того, в гумифицированных водах железобактерии – различные виды

Arthrobacter и Siderocapsa осаждают железо из комплексных соединений гуматов железа, они разлагают гумус в процессе окисления железа [6].

Поэтому кислород, содержащийся в придонных слоях озер Лизинка и Клюквенное, является важным контролирующим фактором, определяющим наиболее интенсивный биологический процесс Fe(III) восстановления при столь низком содержании общего железа в грунтах (рис. 10).

В донных осадках озер Харовое, Шелехметское, Малое Карстовое, Серебрянка и Подгорское определены наиболее высокие концентрации нерастворимых форм Fe(II).

Fe(II) минералы в виде которых восстановленное железо остается в осадках или осаждается их придонных слоев могут быть в форме сидерита, гидроксидов, смешанных Fe(II)-Fe(III) компонентов, Fe(II) силикатов, вивианита, аморфных форм Fe(II), адсорбированных глинами и органическим веществом. Связывание Fe(II) в сульфид (FeS) и пирит (FeS₂) может быть существенным в осадках гиперевтрофных и евтрофных озер, обогащенных серосодержащим органическим веществом.

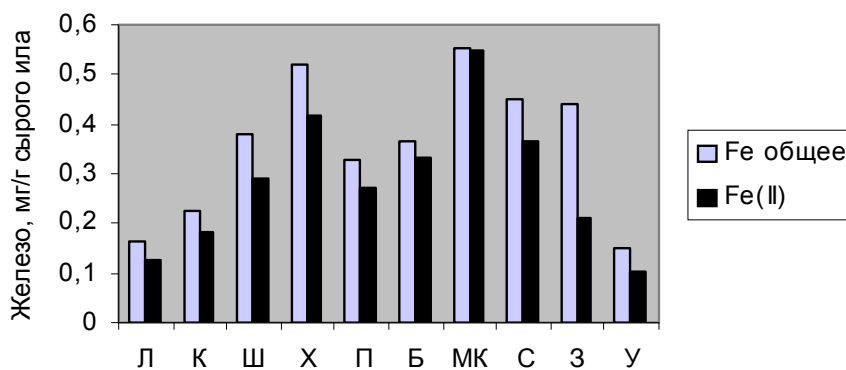


Рис. 10. Содержание железа в грунтах

Органическое вещество илов

Исследования показали, что бентосное сообщество тонко реагирует на изменение органической компоненты среды, определяющей развитие тех или иных эколого-физиологических групп микроорганизмов.

Важным параметром является тип накопления органического вещества, определяющий наличие субстратов и активность бактерий, способных к деструкции органического вещества.

Fe(III) редукция в мелководных озерах с окрашенной водой и торфянистыми илами. Наиболее активные процессы Fe(III) редукции выявлены в накопительных культурах озер Лизинка и Клюквенное (рис. 11).

Полученные данные свидетельствуют о чрезвычайно высоких скоростях и глубокой деструкции органического вещества в торфянистых илах.

Микроорганизмы донных сообществ этих озер отличаются способностью восстанавливать Fe(III) пиррофосфат и при этом окис-

лять анаэробно широкий спектр субстратов, таких как:

- сложные углеводы, белки;
- продукты их разложения, включая лактат и ацетат;
- газообразные субстраты – водород и метан.

Отличительной особенностью Fe(III) редукции в мелководных гумифицированных озерах с окрашенной, слабо минерализованной водой, торфянистым (Клюквенное, Лизинка), железисто-песчаным (Золотенка) тонкодетритным илом (Серебрянка), и неокрашенной минерализованной водой и тонкодетритным илом озера Харовое является то, что в микробных донных сообществах активны газотрофные Fe(III) восстанавливающие бактерии. Процессы, связанные с окислением водорода, а в озерах с окрашенной водой – водорода и метана играют в поверхностных слоях илов существенную роль.

В накопительных культурах с пробами донных отложений 0-5 см слоя илов озер Ли-

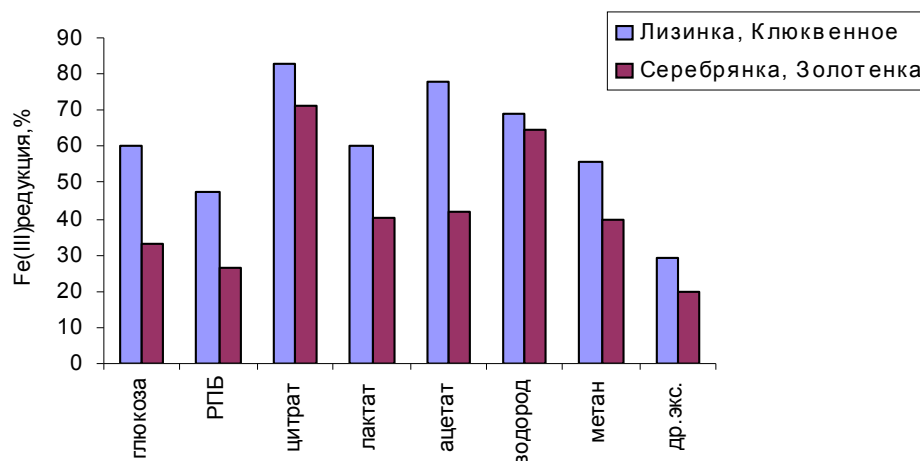


Рис. 11. Fe(III) редукция в накопительных культурах озер с окрашенной водой

зинка, Клюквенное, Золотенка и Серебрянка и субстратами водородом и метаном, озера Харовое – водородом, активно восстанавливался Fe(III) пирофосфат. Эти данные характеризуют накопление водорода и метана в илах, отражая процессы деструкции органического вещества до газообразных субстратов непосредственно в донных отложениях. Следует отметить наиболее интенсивное окисление водорода и метана в газовыделяющих мелких озерах с гумусом болотного происхождения (Лизинка и Клюквенное). Причем, что очень важно, высокая активность газотрофных Fe(III) восстанавливающих бактерий в накопительных культурах проявилась уже в суточных культурах. Эти данные характеризуют происходящие в озерных илах процессы Fe(III) редукции.

Установлена обратная зависимость Fe(III) восстановления на водороде и отноше-

нием БПК₅/ХПК (рис. 12).

Fe(III) восстановление на водороде обратно пропорционально содержанию легкоокисляемой органики в илах (рис. 12). Активны бактерии донных сообществ гумифицированных озер с 13-6,9% удельной концентрацией легкоокисляемого органического вещества. Очень низкая активность водородокисляющих бактерий в гиперевтрофных озерах Подгорское, Бездонное, Малое Карстовое, в евтрофном Шелехметском и Ужином с 20-27% содержанием легкоокисляемого вещества (рис. 13).

Можно прогнозировать, что в озерах с низким отношением БПК₅/ХПК важной группой Fe(III) восстанавливающих бактерий являются представители рода *Shewanella*. Известно, что основными субстратами бактерий в осадках пресноводных экосистем являются водород и формиат. Как показали наши ис-

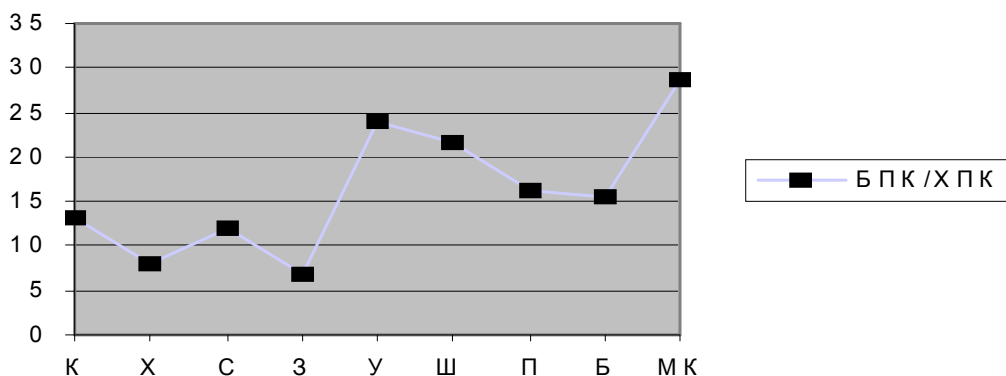


Рис. 12. Отношение БПК₅/ХПК в придонной воде озер: К – Клюквенное; Х – Харовое; С – Серебрянка; З – Золотенка; У – Ужиное; Ш – Шелехметское; П – Подгорское; Б – Бездонное; МК – Малое Карстовое

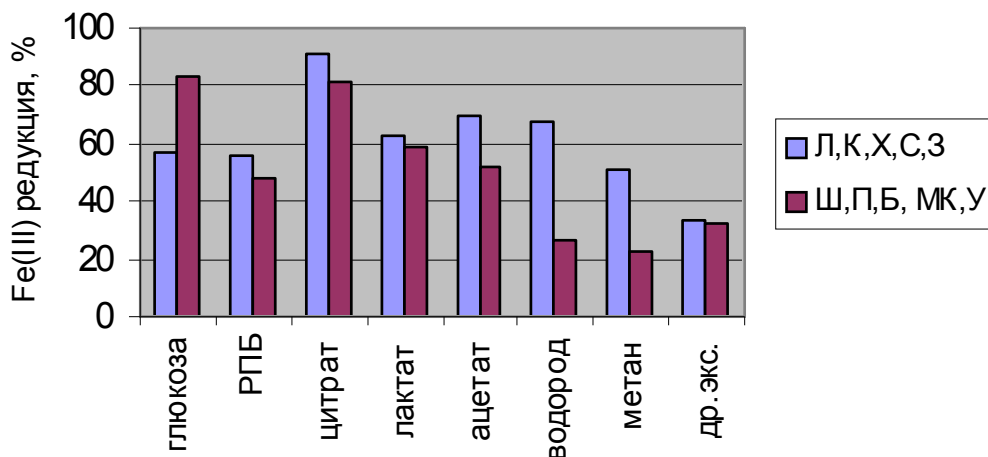


Рис. 13. Среднее Fe(III) восстановление в озерах с низкими коэффициентами БПК₅/ХПК (Лизинка, Клюквенное, Харовое, Серебрянка, Золотенка) и более высокими - коэффициентами БПК₅/ХПК (Шелехметское, Подгорское, Бездонное, Малое Карстовое, Ужиное)

следования, эти субстраты интенсивно окисляются сообществами и чистыми культурами, выделенными из донных осадков озер Клюквенное и Лизинка [7]. Бактерии семейства *Geobacteriaceae* могут развиваться в донных сообществах мелководных озер, так как они способны метаболизировать бензольные и фенольные соединения, выделяющиеся при разложении гумуса.

Вторая группа озер включает подверженные летней стратификации озера Бездонное, Шелехметское, Малое Карстовое и Подгорское.

Микробиологические процессы анаэробной деструкции органического вещества на поверхности и верхнем слое донных отложений озер отличаются от процессов, протекающих в мелководных торфянистых и песчаных осадках. Озера с высокой продукцией фитопланктона обеспечены легкоокисляемым органическим веществом и в них развиваются бактерии с гетеротрофным метаболизмом. Поэтому в илах гиперевтрофных и евтрофных озер имеет место изобилие легкодоступных органических веществ, интенсивно протекают гетеротрофные деструкционные процессы в толще воды и на поверхности илов. Основной функцией хемоорганотрофных бактерий в донных осадках озер является деструкция углеводов, бактерии участвуют также в распаде белков и жиров. Поэтому в накопительных культурах Fe(III) редуцентов активно протекают процессы окисления глюкозы, белков, аминокислот и продуктов ферментации, включая ацетат. В то же время сообщества озерных илов характеризуются слабыми процессами Fe(III) редукции при окислении водорода и метана (рис. 13).

Продукты анаэробного распада органического вещества в стратифицированных озерах, такие как метан, аммиак, нитриты поступают в экологическую нишу хемосинтетиков и обуславливают их массовое развитие и активное функционирование в основном в гиполимнионе озер. В гиполимнионе создаются благоприятные условия для Fe(III) редуцентов, метаногенов и сульфатредукторов. Здесь определены наиболее низкие концентрации кислорода и низкие значения окислительно-восстановительного потенциала, присутствуют летучие органи-

ческие кислоты, разложение которых идет с образованием метана, CO₂ и водорода. Часть газообразных субстратов окисляется анаэробно в гиполимнионе в Fe(III) восстановительных процессах. Остальные диффундируют вверх и окисляются кислородом в микроаэрофильных и аэробных процессах на границе между мета- и гиполимнионом, затем в металимнионе. Неокисленные газообразные субстраты выделяются в атмосферу. Окисленное кислородом и железоокисляющими бактериями железо {Fe(III)} осаждается в гиполимнион и восстанавливается до Fe(II) акцептируя электроны при окислении H₂ и CH₄. Таким образом, на нижней границе гиполимниона стратифицированных озер находится экологическая ниша водород- и метаноокисляющих бактерий.

Продукты гидролиза полимеров, а также продукты сбраживания и анаэробного окисления органического вещества в гиполимнионе осаждаются и метаболизируются микроорганизмами донных осадков.

Направленность процесса деструкции вещества типичными хемоорганотрофами по пути окисления органического вещества до CO₂ и H₂O или сбраживания до лактата, бутирата, спиртов, ацетата на экранирующем слое а также в толще донных отложений зависит от многих параметров.

На основании проведенных исследований озер Самарской Луки установлено, что контролируемыми факторами Fe(III) восстанавливающей активности донных отложений озер являются глубина и уровень трофии водоемов, тип накопления и степень минерализации органического вещества в илах. Очень важными факторами являются температура, pH, Eh, содержание кислорода и соотношение легкоокисляемого и трудноокисляемого органического вещества в донных осадках.

Общий процесс деструкции органического вещества в донных осадках можно оценить определив суммарную Fe(III) редукцию с ацетатом и Fe(III) редукцию с водородом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lovley, D. R., Phillips, E. J. P. Availability of ferric iron for microbial reduction in

- bottom sediments of the freshwater tidal Potomas River // *Appl. Environ. Microbiol.* 1986. № 52.
2. *Lovley, D. R., Phillips, E. J. P.* Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction in sediments // *Appl. Environ. Microbiol.* 1987. V. 53. № 11.
 3. *Заварзин Г. А., Колотилова Н.Н.* Введение в природоведческую микробиологию. М.: Университет, 2001.
 4. *Lovley D. R., Lonergan D. J.* Anaerobic oxidation of toluene, phenol and p-cresol by the dissimilatory iron-reducing organism, GS-15 // *Appl. Environ. Microbiol.* 1990. V. 56. № 6.
 5. *Lovley, D. R., Giovannoni S. J., White D.C., Champine J.E., Phillips, E.J.P, Gorby Y. A., Goodwin S.* *Geobacter metallireducens* gen. nov., sp. nov., a microorganism capable of coupling the complete oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals // *Arch. Microbiol.* 1993. V.159.
 6. *Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С.И.* Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977.
 7. *Потехина Ж.С.* Редукция Fe(III) соединений в анаэробных культурах бактерий, окисляющих метан и метанол // *Известия Самарского научного центра РАН. Спецвыпуск "Актуальные проблемы экологии"*. 2003. Вып. 1.

OXIDATION OF ACETATE AND HYDROGEN BY Fe(III) REDUCING BACTERIA FROM LAKE SEDIMENTS OF NATIONAL PARK "SAMARSKAJA LUKA"

© 2005 J.S. Potekhina

Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Togliatti

Studies of enrichment cultures from lake sediments indicated, that Fe(III) reduction coupled with acetate and hydrogen oxidation was a common, universal process, summarizing all aerobic and anaerobic organic matter decomposition within microbial communities. The activity of Fe(III) reducing microorganisms depend from many parameters. Ecological factors were determined, controlling the development of acetate- and hydrogen oxidizing Fe(III) reducers in sedimentary environments.