Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2026. – Т. 35. – № 2. – С. 25-33.

УДК 579.266:579.68:552.125.4 **DOI: 10.24412/2073-1035-2026-35-2-25-33**

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ БАКТЕРИАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА В БИОГЕНЕЗЕ ВИВИАНИТА

© 2026 Н.Г. Шерышева

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти (Россия)

Поступила 21.04.2026

Аннотация. Представлены результаты исследований таксономической и функциональной структуры бактериального сообщества, ассоциированного с процессом биогенеза вивианита – $Fe_3(PO4)_2 \cdot 8H_2O$. Образование минерала вивианита происходило в накопительной культуре бактерий, окисляющих водород при анаэробном Fe(III) железовосстановлении. На стадии кристаллизации минерала установлена функционально-таксономическая структура накопительной культуры бактерий. В составе сообщества выявлено 15 таксонов родового и видового рангов, включающих как типичные железоредукторы, так и различные функциональные группы бактерий из филумов Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Bacteroidota, Desulfobacterota, Acidobacteriota. Установлено доминирование представителей родов *Aeromonas*, *Pseudomonas* и *Acetobacter*, что указывает на ведущую роль этих групп бактерий в создании физико-химических условий для кристаллизации фосфатов железа(II). Железоредуцирующие бактерии, восстанавливающие Fe(III) до Fe(II) в анаэробных условиях, представлены *Geobacter sulfurreducens, Geothrix fermentas* и FeRed KM-2, субдоминанты – анаэробными бродильщиками рр. *Bacteroides, Clostridium, Propionibacterium.* Второстепенные позиции заняли сульфатредуцирующие бактерии р. *Desulfotomaculum*, а также факультативные анаэробы и аэробы рр. *Enterobacter, Bacillus. Agrobacterium, Rhodococcus*, которые разлагают широкий спектр углеводов, полимеров и углеводородов, создавая анаэробную зону. В накопительной культуре на стадии минерализации вивианита формируется устойчивый бактериальный консорциум, таксономическая структура которого организована по принципу синтрофии. Метаболические и трофические связи внутри бактериального консорциума обеспечивают оптимальные условия для жизнедеятельности Fe(III)-редуцирующих бактерий, играющих ключевую роль в инициации биогенеза вивианита. Для идентификации родовой/видовой принадлежности бактерий применялся метод газовой хромато-масс спектрометрии на основе базы жирнокислотных микробных маркеров.

Ключевые слова: Fe(III) восстановление, накопительные культуры бактерий, таксономический состав, биогенный вивианит, жирнокислотные микробные маркеры

Введение

Участие минералов в биогеохимических процессах, а также возможность их практического применения в биотехнологии интенсивно исследуются в последние десятилетия. Большой интерес вызывают минералы биогенного происхождения, в том числе железосодержащие, такие как грейгит, магнетит и особенно – в настоящее время – вивианит. Исследования по изучению бактериальных сообществ и их роли в образовании вивианита имеют перспективы в изучении взаимодействия между бактериями и минералами, в разработке новых методов для управления экосистемами и восстановления загрязненных территорий, в применении результатов исследований в биологии и экологии (Wang et al., 2025; Wilfert et al., 2018). Так, выявлено свойство вивианита образовывать устойчивые защитные пленки на поверхности металлов в полифосфатных сточных водах. Вивианит является важным продуктом диссимиляционного восстановления железа и перспективным способом извлечения фосфора из сточных вод, систематически анализируется его практическое применение в области охраны окружающей среды, включая иммобилизацию тяжелых металлов, дехлорирование тетрахлорметана, секвестрацию фосфора в осадочных породах и снижение эвтрофикации, обсуждаются его потенциальные функции в качестве удобрения (Wilfert et al., 2018; Yuan et al., 2021). В целом, ожидается, что вивианит внесет значительный вклад в будущие научные исследования, особенно в решение экологических проблем в области охраны окружающей среды (Yuan et al., 2021, Knyazev et al., 2024).

Вивианит $Fe^{2+}{}_3[PO4]_2 \cdot 8H_2O$ – природный минерал, водный фосфат двухвалентного железа,

Шерышева Наталья Григорьевна, канд. биол. наук, доц., науч. сотр., sapfir-sherry@yandex.ru

является конечным продуктом процесса восстановления Fe(III) в результате жизнедеятельности микроорганизмов, образуется в результате биохимических реакций, связанных с разложением органических веществ в условиях, богатых органическими веществами, где снижен уровень кислорода. Микроорганизмы, используют железо в качестве акцептора электронов, восстанавливают Fe(III) до Fe(II). В водных экосистемах вивианит играет важную роль в циклах фосфора и железа, способствует накоплению питательных веществ в донных осадках, служит индикатором биогеохимических процессов.

Отмечено образование вивианита в чистых бактериальных культурах и сокультурах в процессе восстановления фосфатного буфера и Fe(III) пирофосфата при анаэробном окислении бактериями водорода и метанола в лабораторных условиях (Балашова и Заварзин, 1979; Потехина, 2006). Исследовалась динамика биогенеза вивианита через образование стадий аморфных структур и центров кристаллизации и представлена схема биохимического преобразования двухвалентного железа в вивианит (Шерышева, Моров, 2012).

Бактериальные сообщества играют важную роль в процессе биогенеза вивианита, участвуя в анаэробном железовосстановлении. Накопительные культуры Fe(III) восстанавливающих бактерий являются ключевыми инструментами для изучения этого процесса. Озерные илы представляют собой уникальную среду, где происходит взаимодействие между микроорганизмами и минералами. В донных отложениях ряда озер Самарской Луки и в Куйбышевском водохранилище был выявлен процесс Fe(III) восстановления (Потехина и др., 2003; Потехина, 2006). Показано, что восстановление Fe(III) в донных отложениях исследованных водоемов осуществляется с разной интенсивностью в накопительных культурах бактерий из десяти эколого-трофических групп: аммонифицирующих, цитратокисляющих, масляно-кислых, лактат-, ацетат-, олигоацетатокисляющих, олиготрофных, метанотрофных, метанолокисляющих и водородокисляющих бактерий, входящих в структуру донных сообществ. При этом Fe(III) пирофосфат восстанавливается биологически до вивианита при окислении метана, метанола и водорода (Потехина, 2006).

В более поздних исследованиях был определен таксономический состав и доминанты бактериальных сообществ, осуществляющих процесс железовосстановления в озерных илах и в накопительных культурах, осуществляющих окисление глюкозы, водорода и метана в анаэробных условиях (Шерышева, Осипов, 2013; Sherysheva et al., 2015; Шерышева, 2025). В накопительных культурах на последних стадиях анаэробного восстановления Fe(III) выпадали кристаллы вивианита. Было отмечено, что активно образование минерального осадка происходило в культурах, окисляющих водород. Однако сведений о видовом составе бактерий, участвующих в конечном этапе процесса железовосстановления – образовании кристаллического осадка вивианита, немного. Остаются недостаточно изученными вопросы ключевых таксонов бактерий и принципы формирования структуры бактериального сообщества, инициирующего биогенез вивианита.

Цель данной статьи – установить таксономический состав бактериального сообщества на стадии кристаллизации вивианита в накопительных культурах водородокисляющих железовосстанавливающих бактерий, определить структуру доминирования и принципы формирования этого сообщества.

Материалы и методы исследования

Микробиологические исследования. Таксономический состав микробного сообщества бактерий, участвующих в образовании вивианита, изучали в бактериальной накопительной культуре, полученной из железистого ила озера Золотенка, расположенного на территории Самарской Луки. Накопительные культуры бактерий готовили следующим образом: в герметично закрытые бутылочки с анаэробной питательной средой «А» вводили 10% ила (Daniel et al., 1999, Потехина и др., 2000). В качестве акцептора электронов в питательные среды добавляли пирофосфат железа – $Fe_4(P_2O_7)_3$ в конечной концентрации по железу 15 мМ/л. Пищевым субстратом служили доноры электронов водорода: 10% азота из газовой фазы замещали смесью газов H_2 : CO_2 (90% : 10%). Инкубирование накопительных культур проводили при 30°С. Для создания ассоциации активных железовосстанавливающих бактерий производили ряд последовательных пересевов полученных накопительных культур в свежие питательные среды. Контролем влияния накопительных культур на восстановление пирофосфата трехвалентного железа служили варианты после автоклавирования.

Аналитические методы. Восстановление Fe(III) оценивали по накоплению Fe(II) в среде. Концентрацию Fe(II) определяли феррозиновым методом на спектрофотометре СФ-46 при 562 нм после экстракции проб 0,5 н. соляной кислотой в течение 15 мин (Lovley, Phillips, 1986). Отбор проб из накопительных культур для анализов осуществляли анаэробно, стерильными 1-миллилитровыми шприцами, проколом через пробку после интенсивного встряхивания образцов.

Рентгенофазовый анализ. Состав минеральных фаз и идентификацию минерала, полученного в результате биогенного железовосстановления, проводили методом рентгенофазового анализа. Анализ

выполнен к.г.-м.н. М.Е. Зеленским в Институте экспериментальной минералогии РАН (г. Черноголовка) на аппарате ДРОН-3 при следующих условиях: U – 30 кВ, I – 20 mA в Co-излучении и использованием компьютерной рентгенографической базы данных PDF-2. Во всех спектрах по горизонтали показаны межплосткостные расстояния d/n (Å), по вертикали – интенсивность пиков I, %. Фотографии кристаллов вивианита сделаны на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega TS 5130 с энергодисперсионным спектрометром INKA.

Для изучения структуры микробного сообщества в осадке с вивианитом после инкубации применяли метод газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (ГХ-МС) (Верховцева, Осипов, 2008; Sherysheva et al., 2015). Определение жирнокислотного состава суммарной биомассы иловых микробиоценозов проводили на ГХ-МС системы AT-5973 SMART фирмы Agilent Technologies (США). Исследование выполнено в лаборатории Академической группы академика РАМН Ю.Ф. Исакова д.б.н. Г.А. Осиповым. Масс-спектрометр квадрупольный с диапазоном масс 2-550 аем имеет разрешающую способность 0,5 аем во всем рабочем диапазоне. Ионизация электронами 70 эВ. Чувствительность прибора составляет 0,01нг по метилстеарату. Для хроматографического разделения пробы использовали капиллярную колонку из плавленого кварца длиной 25 м и внутренним диаметром 0,25 мм. Неподвижная фаза: HP-5ms Хьюлетт-Паккард с толщиной слоя 0,25 мкм. Хроматографирование проводили в режиме программирования температуры от 120 до 320°C со скоростью 5 град/мин. Температура инжектора и интерфейса 280°C. Обработку данных проводили с помощью штатных программ прибора. Вещества в хроматографических пиках идентифицировали с помощью библиотечных программ с базами данных масс-спектров NIST.

Состав микробных сообществ рассчитывали в электронных таблицах Excel с помощью разработанного алгоритма расчета, дополненного локальной базой жирнокислотных маркеров, разработанной нами для сообществ озерных илов (Верховцева, Осипов, 2008; Sherysheva et al., 2015), Данный анализ дает возможность определить качественный и количественный состав микробного сообщества.

Результаты

Образование минерального осадка в накопительной культуре водородокисляющих железовосстанавливающих бактерий. В условиях эксперимента в период бактериального роста регистрировалось активное продуцирование двухвалентного железа. В течение первых 10-ти суток экспонирования концентрация растворимого двухвалентного железа в жидкой фазе увеличилась от первоначального значения 7,40 мг Fe(II)/л до 62,40 мг Fe(II)/л, а через 20 суток составила 80,12 мг Fe(II)/л. Через 90 суток в накопительной культуре регистрировалось выпадение минерального осадка (рис. 1). Рентгенофазовый анализ образованного в конце эксперимента осадка установил наличие минерала вивианита – $Fe_3(PO4)_2 \cdot 8H_2O$ (d = 6,816Å) (рис. 2).

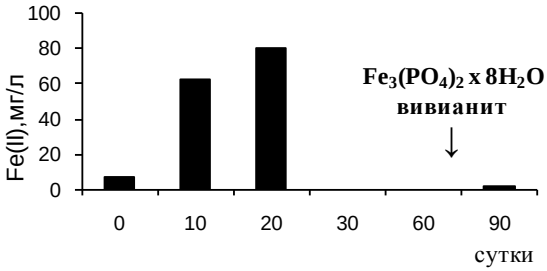




Рис. 1. Изменение концентрации Fe(II) и образование минерального осадка в жидкой фазе во время экспонирования накопительной культуры железовосстанавливающих бактерий при окислении водорода (Шерышева, Осипов, 2013)**. Внизу – порошкообразный осадок вивианита.**

Fig. 1. Changes in Fe(II) concentration and the formation of a mineral precipitate in the liquid phase during exposure to an enrichment culture of iron-reducing bacteria during hydrogen oxidation (Sherysheva, Osipov, 2013)**. On the bottom is a powdery precipitate of biogenic vivianite.**

Морфология осадка. Электронный микроскопический анализ полученного осадка демонстрирует на фотографии морфологическую структуру биогенного вивианита в виде кристаллов разнообразных прямоугольных форм (фототабл. 1).

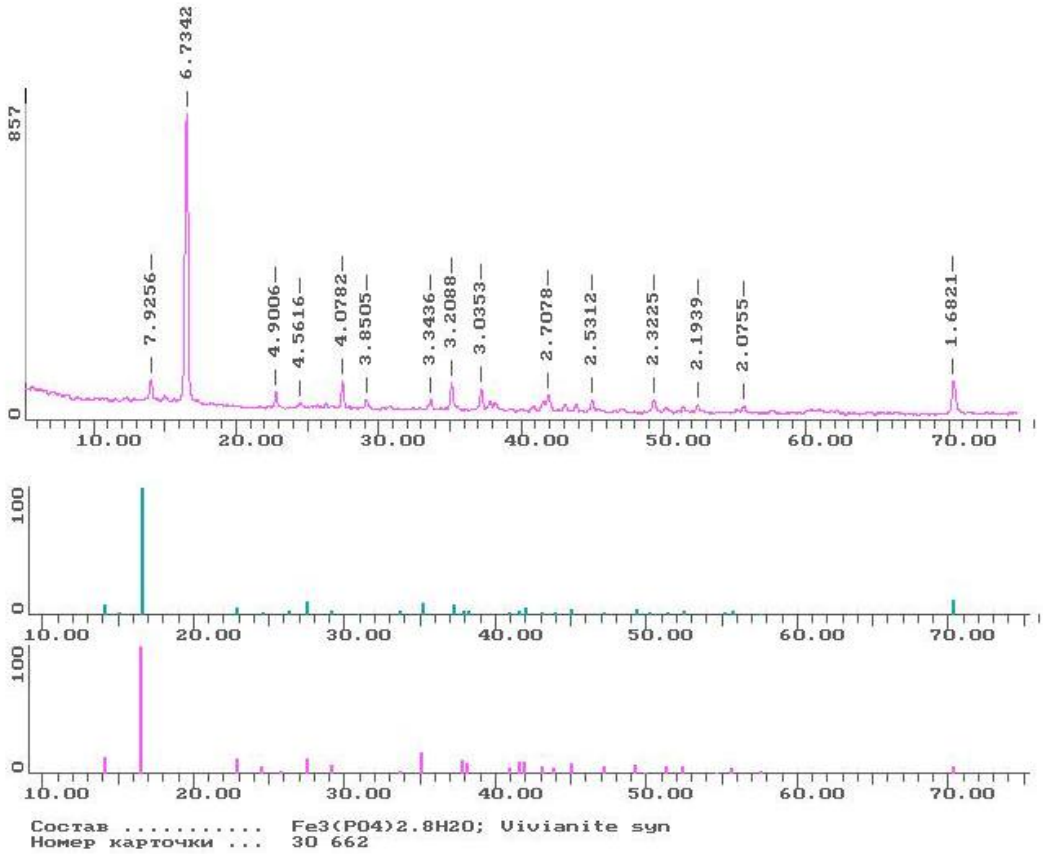


Рис. 2. Дифракционный спектр осадка после 90 суток инкубации: аморфное вещество, линии вивианита $Fe_3(PO4)_2 \cdot 8H_2O$: d = 6,8161Å.

Fig. 2. Diffraction spectrum of the sediment after 90 days of incubation: amorphous substance, vivianite lines $Fe_3(PO4)_2 \cdot 8H_2O$: d = 6.8161Å.

Цвет осадка варьировал от серо-голубого до сине-зеленого. Структура – порошкообразная или мелкокристаллическая (рис. 1, фототабл. 1).

Размер кристаллов 0,05-3 мм. Вивианит легко рассыпался при встряхивании, интенсивно окрашивая среды в голубые и сине-зелёные тона. При микроскопическом исследовании выявлена форма кристаллов и их агрегатов: плоские прямоугольники, иглы, щепы, призматические, игольчатые или звездчатые розетки, конкреции. Таким образом, аналитически установлен процесс биогенного образования вивианита в процессе Fe(III) восстановления в накопительных водородокисляющих бактериальных культурах.

Таксономический профиль бактерий на стадии биоминерализации вивианита. Бактериальное сообщество на стадии формирования биогенного вивианита включает 15 таксонов родового и видового рангов из шести филумов: Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Bacteroidota, Desulfobacterota, Acidobacteriota (рис. 3). Обнаружен не идентифицированный железоредутор FeRed RM-2.

Согласно полученным данным, бактериальное сообщество железовосстанавливающих бактерий характеризуется высоким таксономическим разнообразием (рис. 3). Обнаружено присутствие аэробных организмов р. *Acetobacter, Agrobacterium radiobacter, Pseudomonas fluorescens,* р. *Rhodococcus.* Факультативные анаэробы представлены р. *Enterobacter, Aeromonas hydrophila,* р. *Bacillus.* Наиболее разнообразными оказались первичные анаэробные бродильщики: рр. *Bacteroides, Clostridium, C. perfringens, Propionibacterium freudenreichii.* Из специализированных организмов в сообществе присутствовали сульфатредукторы р. *Desulfotomaculum* и бактерии цикла железа – железоредукторы *Geobacter sulfurreducens, Geothrix fermentas* и FeRed KM-2, выделенный из речного ила (Н. Лебедева, частная коллекция). Количественный состав позволил оценить структуру доминирования бактериального сообщества, инициирующего биогенез вивианита. Основной вклад в численность вносят доминанты *A. hydrophila* (33,12%), *Ps. fluorescens* (16,30%) и *Acetobacter* (16,02%). Субдоминанты представлены одним родом *Clostridium* (9,44%). Специфические железоредукторы *Geobacter sulfurreducens, Geothrix fermentas* и FeRed KM-2 занимали второстепенные позиции (0,68-2,84%).

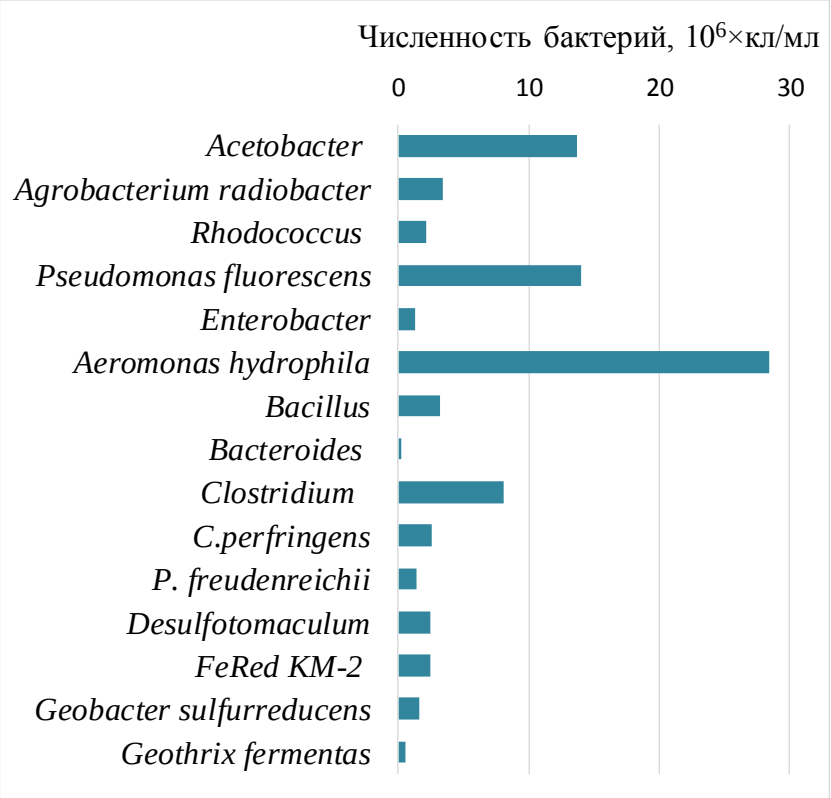


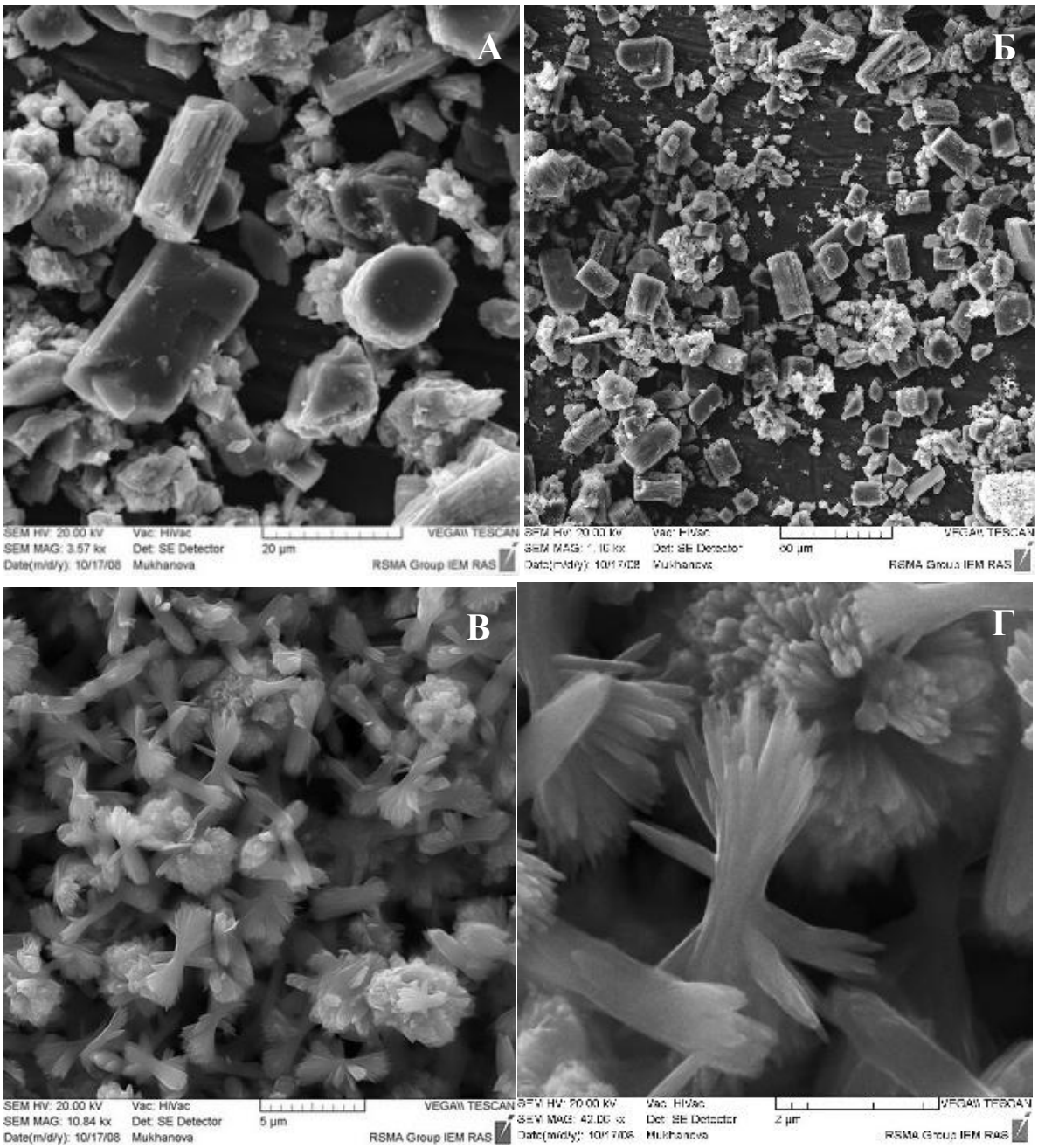
Рис. 3. Таксономический состав бактериального сообщества, участвующего в образовании вивианита.

Fig. 3. Taxonomic composition of the bacterial community involved in vivianite formation.

Обсуждение

В процессе биогенного синтеза вивианита формируется адаптированное к условиям культивирования железовосстанавливающее бактериальное сообщество. Согласно представленным данным, накопительная культура водородокисляющих железовосстанавливающих бактерий, сформированная на стадии образования вивианита в процессе Fe(III) восстановления, характеризуется высоким функциональным разнообразием. Выделяется ключевая группа бактерий – доминирующие таксоны *Aeromonas hydrophila*, *Pseudomonas fluorescens* и *Acetobacter*. Высокое содержание бактерий р. *Aeromonas* указывает на их активное участие в возможном прямом восстановлении Fe(III). Установлено, что представители р. *Aeromonas* способны восстанавливать Fe(III) в рисовых почвах и образовывать кристаллы вивианита (Wang et al., 2009). Водородная бактерия *Pseudomonas fluorescens* обладает широким метаболическим потенциалом, включая выделение сидерофоров и органических кислот, что способствует мобилизации фосфатов и железа (Trapet et al., 2016). Кроме того, активно потребляя кислород, *Ps. fluorescens* создает микроаэрофильные условия, что благоприятно для Fe(III) железовосстановления. *Ps. fluorescens* в анаэробных условиях переключается с органических субстратов на водород, используя его в качестве донора электронов. Высокое содержание водорода в газовой фазе и его доступность стимулирует рост *Ps. fluorescens*, позволяя успешно конкурировать с железоредукторами за доноры электронов. Ацетобактерии (р. *Acetobacter*) в анаэробных условиях способны осуществлять сбраживание органических субстратов до ацетата, который обеспечивает энергией и питанием железоредукторов в анаэробных условиях.

Бродильщики – субдоминант р. *Clostridium* и менее значимые *Propionibacterium freudenreichii*, *Bacteroides* – разлагают сложные органические вещества, превращая их в более доступные соединения для остальных организмов, а также создают условия для восстановления. *Desulfotomaculum* присутствует в сообществе как сопутствующая микрофлора, обладает высокой выживаемостью в неблагоприятных условиях благодаря способности образовывать эндоспоры, восстанавливает сульфаты. Известно, что специализированные виды р. *Desulfotomaculum* способны наряду с сульфатами эффективно восстанавливать Fe(III) (Tebo, Obraztsova, 1998; Zavarzina et al., 2018).



Фототабл. 1. Кристаллы и агрегаты биогенного вивианита, образованного в накопительной культуре водородокисляющих железовосстанавливающих бактерий в процессе Fe(III) восстановления. Масштабная метка: А – 20 мкм, Б – 50 мкм, В – 5 мкм, Г – 2 мкм.

Phototabl. 1. Crystals and aggregates of biogenic vivianite formed in the enrichment culture of hydrogen-oxidizing iron-reducing bacteria in the process of Fe(III) reduction. Scale mark: A – 20 µm, B – 50 µm, C – 5 µm, D – 2 µm.

В составе сообщества идентифицированы железоредукторы – FeRed KM-2 и виды *Geobacter sulfurreducens, Geothrix fermentas.* Представители родов *Geobacter* и *Geothrix* являются электроактивными микроорганизмами, способными к внеклеточному переносу электронов на оксиды Fe(III). Несмотря на их относительно низкую численную долю в данной системе, присутствие этих типичных железоредукторов подтверждает протекание процесса диссимиляционного восстановления железа. Данный процесс является важным для накопления в среде ионов и последующего достижения состояния сатурации (пересыщения) раствора относительно вивианита.

В сообществе присутствуют минорные организмы с низкой численностью, процентный состав которых в сообществе менее 2,5%. Это организмы, не способные конкурировать за пищевые и энергетические ресурсы в условиях анаэробной железоредукции, а также использовать Fe(III) в качестве акцептора электронов. К ним

относятся аэробные рр. *Enterobacter*, *Rhodococcus*, *Pr. freudenreichii*.

В накопительной культуре прослеживается структура бактериального консорциума, таксономическая структура которого организована по принципу синтрофии: продукты жизнедеятельности одних видов бактерий становятся пищевыми субстратами для других. В результате гидролиза и ферментации сложных органических веществ, осуществляемых первичными бродильщиками, образуются низкомолекулярные соединения – органические кислоты (ацетат, лактат и др.), спирты, молекулярный водород. Эти продукты служат источником энергии для других групп бактерий. Железоредукторы (*Aeromonas*, *Geobacter*, *Geothrix*, FeRed КМ-2) используют эти продукты для восстановления Fe(III) до Fe(II), что при наличии фосфатов ведет к кристаллизации вивианита.

Роль бактерий в динамике образования вивианита состоит в создании пересыщенного раствора ионов двухвалентного железа, в результате которого в условиях динамического равновесия между жидкой и твердой фазой формируется вивианит. В пересыщенном растворе ионов двухвалентного железа возникают центры кристаллизации (предположительно, гидроксофосфаты), вокруг которых формируется кристаллическая решетка вивианита. Образование и рост кристаллов – это уже физико- химический процесс, характерный для постбиогенной стадии (Шерышева, Моров, 2012; Королев и др., 2025).

Заключение

Бактериальное сообщество на стадии биоминерализации вивианита характеризуется высоким таксономическим разнообразием, адаптацией к анаэробным условиям и сложной функциональной организацией. Методом ГХ-МС в составе бактериального сообщества установлено 15 таксонов родового/видового рангов, относящихся к филумам Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Bacteroidota, Desulfobacterota, Acidobacteriota. Доминирующее положение занимают представители родов *Aeromonas*, *Pseudomonas* и *Acetobacter*, субдоминанты представлены р. *Clostridium*, а специализированные железоредукторы – р. *Geobacter*, р. *Geothrix*, FeRed КМ-2.

Между функциональными группами бактерий устанавливаются метаболические связи, основными из которых являются трофические взаимодействия. Формируется устойчивый бактериальный консорциум по принципу синтрофии, при котором метаболизм одних бактерий напрямую зависит от продуктов жизнедеятельности других. В результате функционирования всего бактериального консорциума обеспечиваются оптимальные условия для активной жизнедеятельности Fe(III) редуцирующих бактерий, которые восстанавливают Fe(III) до Fe(II) в анаэробных условиях и играют ключевую роль в инициации биогенеза вивианита. Кооперативное взаимодействие участников консорциума выступает детерминирующим фактором, индуцирующим последующий биогенез вивианита.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. *Автор выражает благодарность д.б.н. Г.А. Осипову (НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева, г. Москва) за выполнение ГХ-МС-анализа, а также к.г.-м.н. М. Е. Зеленскому (ИЭМ РАН, г. Черноголовка) за помощь в проведении рентгенофазового анализа ила и микроанализа кристаллического вивианита.*.

Работа выполнена сотрудником лаборатории гидробиологии в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН по теме «Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем» № FMRW-2025-0046 (№1024032600218-3-1.6.20).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список русскоязычной литературы

Балашова В.В., Заварзин Г.А. Анаэробное восстановление окисного железа водородной бактерией // Микробиология, 1979. Т. 48. Вып. 5. С. 773-778.

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.

Королев Э.А., Нуриев И.С., Ескин А.А., Латыпов А.И., Мухаметбареев Р.Р., Дубинин О.В., Газизянов Р.Р. Вивианитовая минерализация на Западно-Биклянском месторождении бентонитовых глин // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки, 2025. Т. 167, № 3. С. 529-543.

Потехина Ж.С., Шерышева Н.Г., Бычек-Гущина И.А., Готтшалк Г. Анаэробный рост бактерий на метане с Fe(III) восстановлением, как электрон акцептирующим процессом. // Изв. Самар. НЦ РАН. 2000. Т. 2. № 2 (4). С. 371-379.

Потехина Ж.С., Шерышева Н.Г., Уманская М.В., Поспелова М.Д. Биологическое Fe(III) восстановление в водоемах Самарской Луки // Заповедное дело России: принципы, проблемы, приоритеты: Мат-лы междунар. науч. конф. Бахилова Поляна, 2003. Т. 1. С. 40-43.

Потехина Ж.С. Метаболизм Fe(III) восстанавливающих бактерий. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2006. 225 с.

Шерышева Н.Г., Моров В.П. Динамика образования вивианита в накопительных культурах метанотрофных и водородокисляющих бактерий в процессе анаэробного Fe(III) восстановления // Самарская Лука: Проблемы региональной и глобальной экологии. 2012. Т. 21, № 3. С. 16-24.

Шерышева Н.Г., Осипов Г.А. Трансформация структуры микробного сообщества в восстановительном процессе в донных отложениях озера Серебрянка (Самарская Лука) // Изв. Самар. НЦ РАН. 2013. Т. 15, № 3 (1). С. 489-496.

Шерышева Н.Г. Эколого-функциональные группы Fe(III)-восстанавливающих бактерий в донных отложениях озер Самарской Луки // Изв. Самар. НЦ РАН. 2025. Т. 27, № 4 (2). С. 404-412.

Общий список литературы / Reference List

Balashova V.V., Zavarzin G.A. Anaerobic reduction of iron oxide by hydrogen bacterium // Microbiology. 1979. Vol. 48, No. 5. P. 773-778. (in Russ.).

Verkhovtseva N.V., Osipov G.A. Gas chromatography – Mass spectrometry method in studying microbial communities of agrocenosis soils // Agrochem. and Ecol. Problems. 2008. No. 1. P. 51-54 (in Russ.).

Korolev E.A., Nuriev I.S., Eskin A.A., Latypov A.I., Mukhametbareev R.R., Dubinin O.V., Gazizyanov R.R. Vivianite mineralization at the West Biklyanskoye bentonite clay deposit // Sci. notes of Kazan Univ. Ser. Natur. Sci. 2025. Vol. 167, No. 3. P. 529-543 (in Russ.).

Potekhina Zh.S., Sherysheva N.G., Bychek-Gushchina I.A., Gottschalk G. Anaerobic growth of bacteria on methane with Fe(III) reduction as an electron-accepting process // Bull. Samara SC RAS. 2000. Vol. 2, No. 2 (4). P. 371-379. (in Russ.).

Potekhina Zh.S., Sherysheva N.G., UmanskayaM.V., Pospelova M.D. Biological Fe(III) reduction in reservoirs of Samarskaya Luka // Nature reserve management of Russia: principles, problems, priorities: Proc. Int. sci. conf. Bakhilova Polyana, 2003. Vol. 1. P40-43. (in Russ.).

Potekhina Zh.S. Metabolism of Fe(III) reducing bacteria. Tolyatti: IEVB RAS, 2006. 225 p. (in Russ.).

Sherysheva N.G., Morov V.P. Dynamics of vivianite formation in enrichment cultures of metatrophic and hydrogen-oxidizing bacteria during anaerobic Fe(III) reduction // Samarskaya Luka: Problems of regional and global ecology. 2012. Vol. 21, No. 3. P. 16-24. (in Russ.).

Sherysheva N.G., Osipov G.A. Transformation of the microbial community structure during the reduction process in the bottom sediments of Lake Serebryanka (Samarskaya Luka) // Bull. Samara SC RAS. 2013. Vol. 15, No. 3 (1). P. 489-496. (in Russ.).

Sherysheva N.G. Ecological and functional groups of Fe(III)-reducing bacteria in the bottom sediments of the lakes of Samarskaya Luka // Bull. Samara SC RAS. 2025. Vol. 27, No. 4 (2). P. 404-412. (in Russ.).

Daniel R., Warnecke F., Potekhina J.S. Gottschalk G. Identification of the syntrophic partners in acoculture coupling anaerobic methanol oxidation to Fe(III) reduction // FEMS Microbiol. Lett., 1999. Vol. 180. P. 197-203.

Knyazev Y.V., Platunov M.S., Ikkert O.P. et al. Microbially mediated synthesis of vivianite by *Desulfosporosinus* on the way to phosphorus recovery // Environ. Sci.-Adv. 2024. Vol. 3, No. 6. P. 897-911.

Lovley D.R., Phillips E.J.P. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments // Appl. Environ. Microbiol. 1986. Vol. 51. P. 683-689.

Sherysheva N.G., Osipov G.A., Khalko V.V. Studying composition of bacteriobenthic communities in the sediments of water ecosystems by fatty acid markers // Inland Water Biol. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 242-249.

Tebo B.M., Obraztsova A.Ya. Sulfate-reducing bacterium grows with Cr (VI), U (VI), Mn (IV), and Fe (III) as electron acceptors // FEMS microbiology letters, 1998. Vol. 162, No. 1. P. 193-199.

Trapet P., Avoscan L., Klinguer A. et al. The *Pseudomonas fluorescens* siderophore pyoverdine weakens Arabidopsis thaliana defense in favor of growth in iron-deficient conditions // Plant Physiol. 2016. Vol. 171, No.1. P. 675-693.

Wang X.J., Chen X.P., Kappler A., Sun G.X., Zhu Y.G. Arsenic binding to iron (II) minerals produced by an iron (III)-Reducing *Aeromonas* strain isolated from paddy soil // Environ. Toxicol. Chem. 2009. Vol. 28, No. 11. P. 2255-2262.

Wang X., Li W., Ma S. et al. Investigation of the mechanism of vivianite formation in the co-fermentation of food waste with residual sludge from different iron sources // Waste Biomass Valor. 2025. P. 1-14. DOI: 10.1007/s12649-025-03310-3.

Wilfert P., Dugulan A.I., Goubitz K., Korving L., Witkamp G.J., Van Loosdrecht M.C. Vivianite as the main phosphate mineral in digested sewage sludge and its role for phosphate recovery // Water Res. 2018. Vol. 144. P. 312-321.

Zavarzina D.G., Gavrilov S.N., Zhilina T.N. Direct Fe (III) reduction from synthetic ferrihydrite by haloalkaliphilic lithotrophic sulfidogens // Microbiology, 2018. Vol. 87, No. 2. P. 164-172.

Yuan Q., Wang S., Wang X., Li N. Biosynthesis of vivianite from microbial extracellular electron transfer and environmental application // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 762. 143076. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2020.143076.

FUNCTIONAL-TAXONOMIC ORGANIZATION OF THE BACTERIAL COMMUNITY IN BIOGENESIS OF VIVIANITE

© 2026 N.G. Sherysheva

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Tolyatti (Russia)

Abstract. The results of studies of the taxonomic and functional structure of the bacterial community associated with the process of biogenesis of vivianite – $Fe_3(PO4)_2 \cdot 8H_2O$ are presented. The formation of vivianite mineral occurred in a cumulative culture of bacteria oxidizing hydrogen during anaerobic Fe(III) iron reduction. At the stage of crystallization of the mineral, the functional and taxonomic structure of the accumulation culture of bacteria was established. The community includes 15 taxa of generic and specific ranks, including both typical iron reducers and various functional groups of bacteria from the phylum Pseudomonadota, Bacillota, Actinomycetota, Bacteroidota, Desulfobacterota, Acidobacteriota. The dominance of representatives of the genera *Aeromonas*, *Pseudomonas*, and *Acetobacter* has been established, which indicates the leading role of these bacterial groups in creating physico-chemical conditions for the crystallization of iron (II) phosphates. Iron-reducing bacteria that reduce Fe(III) to Fe(II) under anaerobic conditions are represented by *Geobacter sulfurreducens*, *Geothrix fermentas*, and FeRed KM-2, subdominants are anaerobic fermenters genera *Bacteroides*, *Clostridium*, *Propionibacterium*. Secondary positions are occupied by sulfate-reducing bacteria genera *Desulfotomaculum*, as well as facultative anaerobes and aerobes genera *Enterobacter*, *Bacillus*. *Agrobacterium* and *Rhodococcus*, which decompose a wide range of carbons, polymers, and hydrocarbons, creating an anaerobic zone. In a cumulative culture, at the stage of vivianite mineralization, a stable bacterial consortium is formed, the taxonomic structure of which is organized according to the principle of syntrophy. Metabolic and trophic connections within the bacterial consortium provide optimal conditions for the vital activity of Fe(III)-reducing bacteria, which play a key role in the initiation of vivianite biogenesis. The method of gas chromatography – mass spectrometry based on a database of fatty acid microbial markers was used to identify the generic/specific identity of bacteria.

***Keywords*:** Fe(III) reduction, enrichment bacterial cultures, taxonomic composition, biogenic vivianite, fatty acid microbial markers