

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В РИЗОСФЕРЕ РИСОВЫХ ЧЕКОВ В ПЕРИОД  
ВЕГЕТАЦИИ РИСА**

**INVESTIGATION OF OXIDATION-REDUCTION PROCESSES IN THE  
RHIZOSPHERE OF RICE PADDIES DURING THE GROWING SEASON OF  
RICE**



**УДК 631.6**

**DOI 10.24411/2588-0209-2020-10211**

**Приходько Игорь Александрович**, кандидат техн. наук, доцент, кафедра «Строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов», Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар

**Владимиров Станислав Алексеевич**, кандидат с/х. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов», Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар

**Хатхоху Екатерина Ивановна**, старший преподаватель, кафедра «Строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов», Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар

**Вербицкий Артем Юрьевич**, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар

**Александров Даниил Александрович**, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар

**Prikhodko Igor Alexandrovich**, Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Kuban

State Agrarian University named after I. T. Trubilin

**Vladimirov Stanislav Alekseevich**, Agricultural Candidate Sciences, Professor, Head of the Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin

**Khatkhokhu Ekaterina Ivanovna**, Senior Lecturer, Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin

**Verbitsky Artyom Yurievich**, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar

**Alexandrov Daniil Alexandrovich**, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar

**Аннотация.** Характеристики окислительно-восстановительного состояния подземных систем часто лежат в основе моделей, факторов переноса и дальнейшего состояния загрязняющих веществ на рисовых оросительных системах и учитываются при разработке и внедрения новых устойчивых стратегий восстановления. В этой работе изучены аспекты определения окислительно-восстановительных характеристик в системах почва / грунтовые воды / водоносный горизонт. Особое внимание уделяется распространенным загрязнителям подземных вод, чувствительным к окислительно-восстановительному потенциалу, таким как хром, мышьяк, а также чувствительным к окислительно-восстановительным элементам, которые влияют на поведение загрязнителей, таким как железо (Fe). В работе используются лабораторные, полевые и модельные исследования, чтобы получить представление о том, как мобилизуются, ослабляются и / или влияют на другие сопутствующие загрязнители в подземных системах, чувствительных к окислительно-восстановительному потенциалу. Оценены методы определения окислительно-восстановительного состояния загрязненных подземных вод; отложения; и почвы; геохимия химически активных минералов железа, таких как сульфиды железа и зеленая ржавчина; лабораторные и полевые исследования,

которые исследуют технологию проницаемого реактивного барьера для обработки неорганических и органических загрязнителей в подземных водах. Проведенные исследования изучают ризосферные процессы на довольно упрощенном аналоге более сложной и взаимодействующей экосистемы рисовых полей, содержащей множество других ключевых членов, взаимодействующих с ризосферной триадой растений, почвы и бактерий. Выполненные наблюдения расширяют наше понимание круговорота железа в ризосфере и помогают индивидуально расшифровать, что корни растений риса могут быть одним из этих ключевых участников как восстановительной, так и окислительной стороны круговорота железа, переносимого почвой.

**Summary.** Redox characteristics of subsurface systems often underlie models, transport factors and further state of pollutants in rice irrigation systems and are taken into account when developing and implementing new sustainable recovery strategies. In this work, aspects of determining the redox characteristics in soil / groundwater / aquifer systems are studied. Special attention is paid to common groundwater pollutants sensitive to redox potential, such as chromium, arsenic, as well as sensitive to redox elements that affect the behavior of pollutants such as iron (Fe). The work uses observational laboratory, field and model studies to gain insight into how other associated pollutants are mobilized, attenuated and / or affected in underground systems that are sensitive to redox potential. Methods for determining the redox state of contaminated groundwater have been evaluated; deposits; and soil; geochemistry of reactive iron minerals such as iron sulfides and green rust; laboratory and field studies that investigate permeable reactive barrier technology for the treatment of inorganic and organic pollutants in groundwater. The studies carried out study rhizosphere processes on a rather simplified analogue of a more complex and interacting ecosystem of rice fields, containing many other key members that interact with the rhizosphere trinity of plants, soil and bacteria. These observations broaden our understanding of the iron cycle in the rhizosphere and help to individually decipher that the roots of rice plants may

be one of these key participants in both the reducing and oxidizing side of the iron cycle carried by the soil.

**Ключевые слова:** рис, урожайность, окисное железо, закисное железо, влажность почвы.

**Key words:** rice, yield, ferric oxide, ferrous ferric, soil moisture.

### **Введение**

Рисовые поля занимают более 6% поверхности пахотных земель и представляют собой основу для выращивания риса, основной продовольственной культуры для более половины населения мира. Чаще всего рис выращивают на затопленных рисовых чеках. В этих заболоченных условиях затопленная почва обычно обеднена кислородом ( $O_2$ ) и богата органическими веществами - идеальная среда обитания для микроорганизмов, восстанавливающих Fe(III). Используя Fe(III) бактерии, как терминального акцептора электронов, оказывают существенное влияние на окислительно-восстановительное состояние минералов железа в почве и активно взаимодействуют с растворенным Fe(II). Обычно это приводит к высоким концентрациям, превышающим несколько сотен микромолей растворенного и фитодоступного Fe(II) в поровых водах ризосферы рисовых полей [1,2].

### **Материалы и методы.**

В лабораторных условиях, абсолютное количество микроаэрофильных Fe(II) - окисляющих бактерий в ризосфере может быть еще выше, а расчетное воздействие несколько занижено. Напротив, в окружающей среде множество других сложных биогеохимических процессов (например, нитрат-зависимое окисление Fe(II), аннамокс, окисляющие хелаторы) могут вносить вклад в окислительную сторону цикла железа в ризосфере, конкурировать с микроаэрофильным дыханием Fe(II) тем самым снизить эффективное влияние микроаэрофильного окисления Fe(II), которое смягчает их роль в минерализации железа. Напротив, связь  $O_2$  от радиальной потери кислорода микроаэрофильными бактериями,

окисляющими Fe (II), может снижать локальные концентрации O<sub>2</sub> вокруг отдельных корней. Образование биоминералов железа, как продукта микробного окисления Fe (II), так и механизм истощение запасов O<sub>2</sub> может создать подходящие условия для микроорганизмов, восстанавливающих Fe (III), обычно чувствительных к O<sub>2</sub>. Эти бактерии могут быть привлечены в окислительно-восстановительную зону вблизи корней и сохранять метаболическую энергию за счет микробного восстановления минералов железа, продуцируемых микроаэрофильными окислителями Fe (II) [3].

Минералы Fe (III) также являются идеальным акцептором электронов для многих бактерий, восстанавливающих Fe (III). Особенно низкокristаллические оксиды Fe (III) (такие как ферригидрит), которые наблюдались на корнях риса и многих других водно-болотных растений в естественных условиях, способствовали высокой численности бактерий, восстанавливающих Fe (III), в ризосфере рисовых чеков. Исследования показали, что связанные с корнями эти микроорганизмы, восстанавливающие Fe (III), показали значительно более высокую относительную численность в ризосфере (> 10%) по сравнению с массой почвы.

На практике ацетат и корневые экссудаты растительного происхождения являются легко доступными биоисточниками углерода и широко обнаруживаются вблизи корней риса. По этим причинам корни, покрытые минералами трехвалентного железа, также представляют собой идеальную среду обитания для бактерий, восстанавливающих Fe (III), таких как *Geobacter*SPP, которые могут сочетать окисление жирных кислот и органических веществ с восстановлением Fe (III) в корнях риса. С учетом текущих результатов стало ясно, что *Geobacter*SPP способен восстанавливать более 30% минералов железного налета за относительно короткое время (менее 24 ч). Учитывая скорость высвобождения более 15 мкмоль Fe (II) в час за счет восстановительного растворения, это демонстрирует, что бактерии, восстанавливающие Fe (III), могут иметь огромное вли-

яние на ремобилизацию и трансформацию минералов железного налета. Эта ремобилизация путем редукции была в центре внимания большого количества сделанных полевых и лабораторных наблюдений. Исследования показали экологически значимое снижение содержания железа, примерно 4,5 мг Fe на г<sup>-1</sup> сухой корневой массы риса. Было установлено, что железо восстанавливается только в бескислородных условиях, так же подтвердилась важность микробного восстановления Fe (III) для окислительно-восстановительного цикла железа в переувлажненных почвах рисовых оросительных систем с умеренным климатом [4]. В настоящее время результаты исследований показали, что уменьшение микробного Fe (III) может не только способствовать значительному уменьшению налета Fe (III) (до 70%), но и существенно повлиять на ремобилизацию Fe (II) из железного налета с высвобождением более чем 23 мг Fe (II) на одно растение менее чем за 48 ч. Это доказывает, что восстановление минералов трехвалентного железа и ремобилизация одной трети исходного осадка железного налета в виде Fe (II) вблизи (в пределах 25 мм).

### Результаты

Минералы железного налета, собранные в конце эксперимента (роста) из I-ой прикорневой зоны корня (около 40 дней), II-ой средней части корня (около 20 дней), и III-ей зоны – кончики корней (свежеобразованные железные бляшки) существенно различались по своему минералогическому составу. Самые старые минералы корневой железной бляшки показали самую высокую степень кристалличности с 15% гетита, около 10% лепидокроцита и некоторое количество упругого ферригидрита (рисунок 1). Минералы корневого железного налета, собранные из II части корневого разреза, состояли из 25% лепидокроцита, около 70% ферригидрита и только 5% гетита (рисунок 1). Свежеобразованный железный налет, собранный с верхушек корней, был представлен ферригидритом > 95% и небольшой фракцией около 4% потенциально сорбированного / комплексобразующего Fe(II).

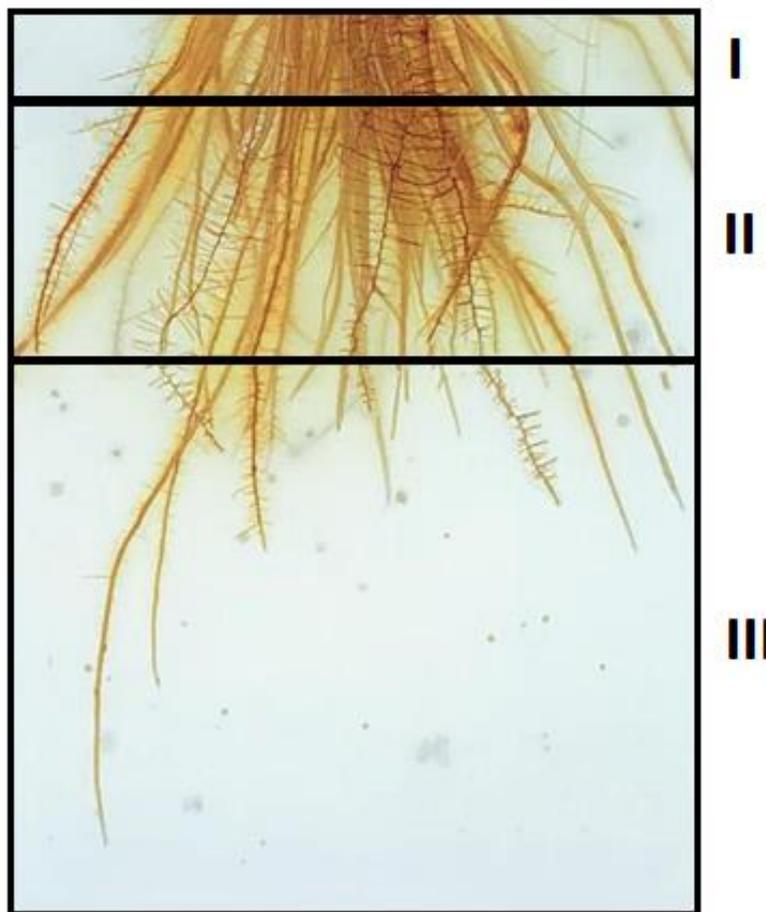


Рисунок 1 – Корневые зоны роста риса:

Площадь поверхности корней увеличивалась во время роста растений в течение 45 дней (рисунок 2).



Рисунок 2 – Стадии роста корневой системы риса

Для определения увеличения площади поверхности корня с течением времени был применен простой анализ изображений, который позволил получить закономерность к увеличению при бл.  $4,3 \text{ см}^2$  площади поверхности корня в сутки ( $R_2 = 0,97$ ) [5]. Развитие корневых железных бляшек во время роста растений в течение 45 дней было идентифицировано также с помощью анализа изображений и выполнено в одной экспериментальной повторности, как показано на рисунке 2.

Высвобождение  $O_2$  из корней приводит к окислению Fe (II) и образованию железистых минералов на поверхности корней по всей ризосфере. После анализа изображений ризосферы мы наблюдали, что через 3 дня на молодых корнях образовались свежесаждаемые минералы железного налета оранжевого цвета (рисунок 2). После роста корней и минерализации железного налета в течение 45 дней как средняя общая площадь поверхности корней, так и площадь поверхности корневого железного налета значительно увеличились по линейной тенденции с течением времени (рисунок 2), со средним образованием  $4,3 \text{ см}^2$  площади поверхности корня ( $R_2 = 0,97$ ) и  $1,7 \text{ см}^2$  площади поверхности железного налета ( $R_2 = 0,98$ ), выпадающего в осадок за сутки. Однако в реплицируемой установке отношение площади поверхности корня, покрытой железным налетом, к площади поверхности корня, не покрытой железным налетом, широко варьировалось в пределах 30 дней от  $< 15\%$  до более  $50\%$  от общей площади поверхности корня, покрытой осадками железного налета (рисунок 2). Тем не менее, к концу эксперимента после 45 дней в среднем  $36 (\pm 2,6) \%$  общей площади поверхности корней в установке была покрыта минералами железного налета, что соответствует средней площади поверхности железного налета корней  $75 (\pm 13,6) \text{ см}^2$  на растение в конце эксперимента [6].

Для количественной оценки степени железного налета, который может

быть восстановлен и ремобилизован микробно, корни рисовых растений, покрытые минералами железного налета, подвергались воздействию 99,8% идентичной *Geobactersp.* CD1 на основе 16S рРНК культуры, обогащающей / Fe(III) - редуцирующей, выделенной с рисового поля. В течение 24 ч минералы железного налета в биотической установке меняли свой цвет с оранжевого на черный, в то время как абиотическая контрольная инкубация оставалась оранжевой (рисунок 3). В биотической установке концентрация растворенного Fe(II) значительно возросла по сравнению с исходной. В ингибированной контрольной инкубации концентрации Fe(II) оставались постоянными на протяжении всего эксперимента с концентрациями Fe(II) [7].



Рисунок 3 – Уменьшение налета корневого железа: минералы железного налета менялись от оранжевого (контроль) до черного (биотический) во время инкубации

Корни, покрытые железным налетом, подвергали воздействию обогащающей Fe(III) - редуцирующей культуры и инкубировали в прозрачном геле для пространственно-временного наблюдения за восстановлением Fe(III) и ремобилизацией Fe(II) из корней. Через 3 дня черный железный налет наблюдался в гетерогенном виде и составлял примерно 50% от общего количества железного

налета на корнях (рисунок 4). Ранее было показано, что изменение цвета от первоначально оранжевых минералов к темным фазам указывает на восстановление Fe(III) и их трансформацию. В последующие дни черные минералы доминировали в корневом железном налете и распространились на всю корневую биомассу (рисунок 4). После 10 дней инкубации вся биомасса корней была полностью покрыта черными минералами (рисунок 4). Растворенный Fe(II) измеряли вольтамперометрическим методом анализа вдоль разреза через ризосферу для количественной оценки растворенного Fe (II) как продукта восстановительного растворения железного налета. Концентрации Fe (II) варьировались в значительной степени от  $< 500$  мкм в положениях без корней до высоких концентраций, достигающих  $>1,5$  мм Fe (II) вблизи корней, покрытых черным осадком.



Рисунок 4 – Микробное уменьшение железного налета Fe(III): корни, покрытые минералами железного налета, инкубировали в ризотроне с культурой обогащения, восстанавливающей Fe(III). Минералы железного налета изменяют свой цвет с течением времени, 0,3,5,7,10 дней.

### Обсуждение результатов

В ранее выполненных исследованиях было высказано предположение, что окисление Fe (II) и образование минералов железа в почвенных экосистемах водно-болотных угодий являются абиотическими процессами, управляемыми

только радиальной потерей кислорода. Однако полевые исследования показали, что нейтрофильные бактерии, окисляющие Fe (II), связаны с корнями, покрытыми железным налётом, а дополнительные исследования в лабораторных условиях показали, что эти бактерии могут активно способствовать окислению Fe (II), в то время как другие подсчитали, что эти бактерии могут даже усиливать образование железных бляшек на корнях до 40% и наблюдали, что низкая численность микроаэрофильных Fe (II) -окисляющих бактерий сопутствовала даже самому низкому образованию железного налета на корнях болотных растений [9].

Хотя сложную геохимическую динамику рисовых почв трудно расшифровать [8], было продемонстрировано, что среды обитания микроаэрофильных Fe (II) -окисляющих бактерий в ризосфере рисовых растений очень динамичны, и что эти бактерии быстро находят идеальные условия в ризосфере растений. Это наблюдение подтверждается данными, в которых обнаружил, что относительная численность микроаэрофильных Fe (II) -окисляющих бактерий в ризосфере превышает их численность в основной массе почвы. Однако даже без участия микроаэрофильных бактерий, окисляющих Fe (II), большое количество минералов трехвалентного железа образовалось вдоль корней и покрыло более 30% поверхности корня с содержанием более 60 мг г<sup>-1</sup>. осаждение сухой массы на корнях. Такое количество микроаэрофильно индуцированного минерального образования железа может привести к выпадению от 0,03 до 0,4 г минеральных веществ в осадок на 1 м<sup>3</sup> рисовой почвы в день при оптимальных условиях. По сравнению с выводом о том, что более 1,2 г почвенного железа, которое может осаждаться на корнях риса в пределах одного кубического метра затопленной рисовой почвы в день, влияние биогенного микроаэрофильного окисления Fe (II) может варьироваться в значительной степени, но потенциально для увеличения чистого общего образования минералов железа в ризосфере прибл. 3–30%. Напротив, мик-

робное окисление почвенного Fe (II) и связывание O<sub>2</sub> этими бактериями потенциально могут снизить кинетику абиотического окисления и уменьшить роль опосредованного растениями образования железных бляшек, предполагая, что общий вклад в окисление Fe (II) может быть еще больше приписан микробной активности [10].

В дополнение к вышесказанному, мы учли, что кончики корней показали наибольшую динамику концентрации O<sub>2</sub>. Во время циклов световой инкубации концентрации O<sub>2</sub> вокруг кончиков корней периодически увеличивались до концентраций O<sub>2</sub> > 100 мкМ, расширяя окисленные зоны на 5–10 мм радиально в бескислородные зоны. И концентрация O<sub>2</sub>, и расширение уменьшились во время циклов инкубации в темноте до концентрации O<sub>2</sub> < 50 мкМ, с радиальным расширением менее 5 мм вокруг кончиков корней. Наряду с застоем в росте корней на 1–3 день на верхушке корня оседают плотные осадки трехвалентного железа, образуя ржавый покров на корневом покрове. Как только рост корня продолжился, кончик корня прорвался через слой минерального железа и оставался свободным от какого-либо минерального покрытия. Формирование этих толстых покрытий железного налета на кончиках корней всегда сопровождалось увеличением радиальной потери кислорода из зон кончиков корней, что подтверждает нашу гипотезу о том, что кончики корней представляют собой высокодинамичную зону для окислительно-восстановительных реакций, таких как окисление Fe (II) и образование низкокristаллических минералов железного налета. Обнаружено, что кончики корней риса могут радиально на 1–4 мм увеличивать локальные окислительно-восстановительные условия. Одним из основных аспектов в текущем исследовании было то, что окислительная способность этих кончиков корней соответствует суточному графику, который коррелируется с доступностью света [11].

Следовательно, в остальной бескислородной среде кончики корней могут

рассматриваться как окислительно-восстановительный катализатор для насыщения ризосферы кислородом и как главный двигатель окислительно-восстановительных изменений в видообразовании почвенного железа. Что еще более важно, доступность  $O_2$ , вызванная кончиками корней, не только изменяет состав железа, но также в значительной степени влияет на окислительно-восстановительную зональность почвы и смещение микробного сообщества по всей ризосфере. В то время как умеренный отток  $O_2$  из кончиков корней ( $5 \text{ мкМ} < O_2 < 50 \text{ мкМ}$ ) может создать оптимальные условия для бактерий. Другие  $O_2$  - зависимые (био) геохимические процессы могут быть запущены меняющейся радиальной потерей кислорода от кончиков корней. Например, было установлено, что временная доступность  $O_2$  может запускать гетеротрофные микроорганизмы или аэробные метанотрофы. Следовательно, это возрастание аэрофильной микробной активности может не только увеличить круговорот органического углерода в почве, но также снизить выбросы  $CH_4$  в рисовые почвы и из них [12].

Мы предлагаем будущие исследования включать аналогичные подходы, повышая целостность биогеохимических взаимодействий, чтобы полностью расшифровать потенциальные перекрестные связи в железном цикле между огромным разнообразием участников. Одним из возможных шагов к пониманию цикла железа в более сложной системе ризосферы могло бы стать количественное пространственно-временное исследование образования корневых железных бляшек в присутствии и отсутствии различных представителей бактерий, участвующих в цикле железа, а также наличие извлеченной с участка почвы, органическое вещество или гуминовые вещества в качестве метаболического субстрата. Более того, в будущих исследованиях можно смоделировать различные методы орошения. Окислительно-восстановительные условия почвы в обозреваемых следованиях поддерживались постоянно аноксическими, что соответствует заболоченному рисовому полю. Однако периодическое осушение рисовых полей может

переключить окислительно-восстановительные условия на преобладающие кислородные условия, подавляя микробное восстановление Fe (III). Все эти переменные параметры, взятые вместе, увеличат понимание этой пространственно-динамической мелкомасштабной редокс-ризосферной системы железа, которая имеет огромное влияние на крупномасштабные наблюдения и должно быть учтено при будущих исследованиях окислительно-восстановительного цикла железа в ризосфере на рисовых полях [13].

### Выводы

Установлено, что молодые корни показали преимущественно низкокристаллический ферригидрит в виде свежесажженного железного налета, доля которого относительно высока  $> 20\%$ , тогда как лепидокрокит и гетит были обнаружены на более старых (приблизительно 42-дневных) корнях. Эти изменения в минералогии железа предполагают, что степень кристалличности железного налета положительно коррелируется с возрастом корней. Как правило, такие зависящие от времени изменения кристалличности наблюдаются в результате процессов преобразования минералов, называемых Оствальдово созревание. С точки зрения окружающей среды эти изменения минералогии железного налета не только влияют на поверхностные свойства самого железного налета, но также снижают сорбционную способность, например питательных и загрязняющих веществ [14].

Снижение сорбционной емкости, как это наблюдалось у минералов железа с более высокой степенью кристаллизации, может иметь серьезные негативные последствия, связанные с удержанием загрязняющих веществ. Более того, было доказано, что высокое относительное содержание кристаллических минералов железного налета снижает биодоступность для микробного восстановления Fe (III) и, следовательно, скорость ремобилизации Fe (II), полученного из железных бляшек. Таким образом, мы пришли к выводу, что со временем минералы железного налета становятся все более устойчивыми к (абиогенному и микробному)

восстановлению Fe (III) и что микробная биодоступность отрицательно коррелируется с возрастом корней. При этом микробные процессы, такие как восстановление Fe (III) и восстановительное растворение, могут быть ингибированы из-за обилия кристаллических минеральных фаз железа, что смещает доминирующее влияние на восстановление железного налета на более распространенные процессы восстановления, вызванные абиотическим действием гуминовых кислот или другими комплексообразующими соединениями растительного происхождения. Эта исследования убедительно подтверждают данные исследований, при которых наблюдалось значительно более низкая скорость восстановления микробного Fe (III) для Fe (III) -редуцирующих бактерий, выращенных на старых или высококристаллических минералах железа, по сравнению с ростом на свежесаженном ферригидрите. Поэтому мы утверждаем, что, хотя кристаллическость минералов корневых железных бляшек увеличивается с возрастом корней, их доступность в качестве субстрата для бактерий, восстанавливающих Fe (III), постепенно снижается в процессе роста растений. В этих условиях мы заключаем, что молодые корни (т.е. кончики корней) могут представлять собой высокодинамичную корневую зону окислительно-восстановительного потенциала железа в которой могут образовываться свежесаженные низкокристаллические минералы железного налета, которые, в свою очередь, сразу же служат идеальным субстратом для микробного восстановления Fe (III). Очевидно, основная корневая зона преимущественно характеризуется более устойчивыми окислительно-восстановительными условиями железа из-за более высококристаллических фракций минералов железа и постоянно насыщенных кислородом условий, которые могут ингибировать восстановление Fe (III). По этим причинам мы утверждаем, что образование железных бляшек, вызванное растениями, изменение минералов и, что более важно, вертикальное динамическое уменьшение железных бляшек необходимо рассматривать как важные параметры для будущих исследований ризосферы на рисовых полях.

Установлена динамическая неоднородность в радиальной потере кислорода, быстрые локальные изменения в составе Fe на концах корней и вокруг них, пространственно-динамическое формирование пригодных для жизни зон как для аэробных Fe (II) - окисляющих, так и для анаэробных Fe (III) - восстанавливающих бактерий, которые тесно связаны с железом.

Список использованной литературы

1. Сафронова, Т.И. Вероятностный подход к решению проблем управления технологическими процессами рисовой оросительной системы / Т.И. Сафронова, С.А. Владимиров, И.А. Приходько // International Agricultural Journal. 2020. Т. 63. № 1. С. 7.
2. Кузнецов, Е.В. Способ подготовки почвы к посеву риса в паровом поле рисового севооборота / Е.В. Кузнецов, А.Е. Хаджиди, И.А. Приходько // Патент на изобретение RU 2457650 С1, 10.08.2012. Заявка № 2010153809/13 от 27.12.2010.
3. Чеботарев, М.И. Способ мелиорации почвы рисовой оросительной системы к посеву риса // М.И. Чеботарев, И.А. Приходько // Патент на изобретение RU 2482663 С2, 27.05.2013. Заявка № 2011123829/13 от 10.06.2011.
4. Приходько, И.А. Управление мелиоративным состоянием почв для экологической безопасности рисовой оросительной системы / И.А. Приходько / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кубанский государственный аграрный университет. Краснодар, 2008
5. Сафронова, Т.И. Информационная модель управления качеством состояния рисовой оросительной системы / Т.И. Сафронова, И.А. Приходько // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 6. С. 11-15.
6. Дьяченко Н.П. Оптимизация ресурсного обеспечения рисовой оросительной системы / Н.П. Дьяченко, И.А. Приходько // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 8. С. 170-173.

7. Владимиров С.А. Вероятностная модель процесса управления мелиоративными мероприятиями / С.А. Владимиров, Т.И. Сафронова, И.А. Приходько // International Agricultural Journal. 2019. Т. 62. № 4. С. 18.
8. Сафронова, Т.И. Анализ оценки земельных ресурсов в сельском хозяйстве / Т.И. Сафронова, И.А. Приходько, Л.Н. Кондратенко // Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 110 - 114.
9. Владимиров, С. А. Парадигма сбалансированного водопотребления при эксплуатации рисовых оросительных систем в Краснодарском крае / С. А. Владимиров, Н. Н. Малышева, Е. И. Хатхоху // Рисоводство. 2019. № 3 (44). – С. 88-94.
10. Малышева, Н.Н. Приоритетные направления развития мелиорации на Кубани / Н.Н. Малышева, С.Н. Якуба, С.А. Владимиров // Рисоводство. 2019. № 1 (42). – С. 58-66
11. Владимиров, С. А. Теоретические аспекты энергетического подхода к анализу влияния климата предпосевного периода на урожайность риса / С. А. Владимиров, Н. Н. Малышева, Е. И. Хатхоху // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2019. № 15 (15). – С. 51-58.
12. Владимиров, С. А. Методологические аспекты совершенствования функционирования компонентов рисового ирригированного фонда / С. А. Владимиров, Н. Н. Малышева, Е. И. Хатхоху, С. Н. Якуба // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2019. № 14 (14). – С. 60-69.
13. Владимиров, С. А. Влияние способов содержания почвы в допосевной период при различных режимах влажности на урожайность риса / С. А. Владимиров // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. Научно-практический журнал. Выпуск № 4(76)/2019. Новочеркасск. – С. 106-110.
14. Владимиров, С.А К вопросу оптимизации режима увлажнения почвы между последовательными посевами риса / С. А. Владимиров // В сборнике: Мелиорация и водное хозяйство Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Шумаковские чтения) с международным участием, посвященной 130-

летию со дня рождения академика Б. А. Шумакова, в 2-х частях. Новочеркасск, 2019. – С. 22-27.

#### References

1. Safronova, T.I. Veroyatnostny`j podxod k resheniyu problem upravleniya texnologicheskimi processami risovoj orositel`noj sistemy` / T.I. Safronova, S.A. Vladimirov, I.A. Pridod`ko // International Agricultural Journal. 2020. T. 63. № 1. S. 7.
2. Kuznecov, E.V. Sposob podgotovki pochvy` k posevu risa v parovom pole risovogo sevooborota / E.V. Kuznecov, A.E. Xadzhidi, I.A. Pridod`ko // Patent na izobrenie RU 2457650 C1, 10.08.2012. Zayavka № 2010153809/13 ot 27.12.2010.
3. Chebotarev, M.I. Sposob melioracii pochvy` risovoj orositel`noj sistemy` k posevu risa // M.I. Chebotarev, I.A. Pridod`ko // Patent na izobrenie RU 2482663 C2, 27.05.2013. Zayavka № 2011123829/13 ot 10.06.2011.
4. Pridod`ko, I.A. Upravlenie meliorativny`m sostoyaniem pochv dlya e`kologicheskoy bezopasnosti risovoj orositel`noj sistemy` / I.A. Pridod`ko / Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texniche-skix nauk / Kubanskij gosudarstvenny`j agrarny`j universitet. Krasnodar, 2008
5. Safronova, T.I. Informacionnaya model` upravleniya kachestvom sostoyaniya risovoj orositel`noj sistemy` / T.I. Safronova, I.A. Pridod`ko // Trudy` Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2007. № 6. S. 11-15.
6. D`yachenko N.P. Optimizaciya resursnogo obespecheniya risovoj orositel`noj sistemy` / N.P. D`yachenko, I.A. Pridod`ko // Trudy` Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2007. № 8. S. 170-173.
7. Vladimirov S.A. Veroyatnostnaya model` processa upravleniya meliorativny`mi meropriyatiyami / S.A. Vladimirov, T.I. Safronova, I.A. Pridod`ko // International Agricultural Journal. 2019. T. 62. № 4. S. 18.
8. Safronova, T.I. Analiz ocenki zemel`ny`x resursov v sel`skom xo-zyajstve / T.I. Safronova, I.A. Pridod`ko, L.N. Kondratenko // Fundamental`ny`e issledovaniya.

2019. № 5. S. 110 - 114.

9. Vladimirov, S. A. Paradigma sbalansirovannogo vodopotrebleniya pri èksploatacii risovy`x orositel`ny`x sistem v Krasnodarskom krae / S. A. Vladimirov, N. N. Maly`sheva, E. I. Xatxoxu // Risovodstvo. 2019. № 3 (44). – S. 88-94.

10. Maly`sheva, N.N. Prioritetny`e napravleniya razvitiya melioracii na Kubani / N.N. Maly`sheva, S.N. Yakuba, S.A. Vladimirov // Risovodstvo. 2019. № 1 (42). – S. 58-66

11. Vladimirov, S. A. Teoreticheskie aspekty` ènergeticheskogo podxoda k analizu vliyaniya klimata predposevnogo perioda na urozhajnost` risa / S. A. Vladimirov, N. N. Maly`sheva, E. I. Xatxoxu // Vestnik Nauchno-metodicheskogo soveta po prirodobustroystvu i vodopol`zovaniyu. 2019. № 15 (15). – S. 51-58.

12. Vladimirov, S. A. Metodologicheskie aspekty` sovershenstvovaniya funkcionirovaniya komponentov risovogo irrigirovannogo fonda / S. A. Vladimirov, N. N. Maly`sheva, E. I. Xatxoxu, S. N. Yakuba // Vestnik Nauchno-metodicheskogo soveta po prirodobustroystvu i vodopol`zovaniyu. 2019. № 14 (14). – S. 60-69.

13. Vladimirov, S. A. Vliyanie sposobov sodержaniya pochvy` v doposevnoj period pri razlichny`x rezhimax vlazhnosti na urozhajnost` risa / S. A. Vladimirov // Puti povыsheniya èffektivnosti oroshaemogo zemledeliya. Nauchno-prakticheskij zhurnal. Vy`pusk № 4(76)/2019. Novoчерkassk. – S. 106-110.

14. Vladimirov, S.A K voprosu optimizacii rezhima uvlazhneniya pochvy` mezhduposedovatel`ny`mi posevami risa / S. A. Vladimirov // V sbornike: Melioraciya i vodnoe xozyajstvo Materialy` Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Shumakovskie chteniya) s mezhdunarodny`m uchasti-em, posvyashhennoj 130-letiyu so dnya rozhdeniya akademika B. A. Shumakova, v 2-x chastyax. Novoчерkassk, 2019. – S. 22-27.