



УДК579:541.18:627.82

## Сорбция коллоидных соединений оксидов железа и марганца с помощью железобактерий на песчаных загрузках очистных сооружений водоподъемных станций

Букреева В.Ю., Грабович М.Ю., Епринцев А.Т.

*ГОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Воронеж*

Дубинина Г.А.

*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва*

Поступила в редакцию 2.04.2009 г.

### Аннотация

Исследован микробиологический состав Mn- и Fe-окисляющих бактерий при функционировании песчаных фильтров очистных сооружений водоподъемных станций ВПС-8 г. Воронежа. Показана роль железоредукторов во вторичном загрязнении питьевой воды растворимыми формами железа. Приведены результаты лабораторного моделирования микробиологического способа удаления растворимых соединений Mn, Fe и других тяжелых металлов из питьевой воды.

**Ключевые слова:** сорбция тяжелых металлов, питьевая вода, песчаные фильтры очистных сооружений, железо- и марганец - окисляющие и -восстанавливающие бактерии

Microbiological composition of Mn- and Fe-oxidising bacteria has been investigated in sand filters of treatment facilities of water elevating stations VPS-8 in Voronezh. The role of iron reducing bacteria in secondary pollution of drinking water by soluble forms of iron is shown. The laboratory method for removal of Mn and Fe water soluble compounds from drinking water has been developed. The results obtained are discussed.

**Key words:** sorption heavy metals, drinking water, sand filters of treatment facilities, iron and manganese oxidizing bacteria, iron and manganese reducing bacteria

### Введение

**Особенности функционирования песчаных фильтров очистных сооружений.** Одним из возможных путей совершенствования методов очистки питьевой воды может служить оптимизация условий работы эксплуатируемых песчаных фильтров с учетом действия биологического фактора. Таким образом, необходимо создание условий, благоприятствующих окислительной функции обитателей песчаных фильтров: железо- и марганцеокисляющих микроорганизмов для удаления марганца и железа из питьевой воды путем трансформации их в

нерастворимую форму, которая эффективно задерживается песчаными фильтрами очистных сооружений водоподъемных станциях г. Воронежа [1].

Железобактерии играют важную роль в природном круговороте, как железа, так и марганца. В поверхностных водах биогеохимический круговорот этих элементов (металлов) представляет собой широкомасштабный процесс.

Марганец и железо являются постоянными компонентами природных пресных вод, и их содержание зачастую превышает уровни основных макроэлементов. Растворимые формы марганца и комплексорганические соединения железа, имеющиеся в поверхностных водах, устойчивы к химическому окислению растворённым кислородом. Круговорот железа и марганца в водоемах состоит в том, что их соединения поступают с водосборной площади в водоем, где они окисляются и осаждаются на дно, затем переходят в восстановленную растворимую форму и могут снова диффундировать в водную массу, что приводит к вторичному загрязнению [2].

Миграция железа и марганца в поверхностных водах в значительной степени зависит от активности микроорганизмов. Биологическая трансформация как марганца, так и железа может осуществляться в результате физико-химических процессов, а также при участии групп железо- и марганцевосстанавливающих и окисляющих микроорганизмов. Причём скорость биогенных процессов окисления железа и, особенно, марганца во много раз превышает химическое окисление.

В результате окислительной деятельности железобактерий, марганец и железо поступают в водоём со стоком или из восстановительного горизонта донных отложений, сравнительно быстро окисляются и концентрируются в донных отложениях, характеризующихся восстановительным режимом и высокой численностью марганец-, железо- и сульфатредукторов. Восстановленные за счет деятельности этих организмов соединения Mn и Fe фильтруются вместе с водой водохранилища в водозаборные скважины [3].

Песчаные фильтры, применяемые в Воронеже на водоподъемных станциях (ВПС), малоэффективны, к сожалению, они не могут сорбировать растворимые формы железа и марганца, которые доминируют в грунтовой воде.

В настоящее время, способы очистки питьевой воды, основанные на аэрации, применении сильных окислителей, коагулянтов и фильтров, не способны справиться с высоким содержанием загрязняющих веществ и тяжелых металлов в воде. Одним из современных направлений, повышающих эффективность сорбции тяжелых металлов в системе песчаных фильтров очистных сооружений, является применение биотехнологических способов очистки питьевых и сточных вод с использованием микроорганизмов.

**Механизм биологической очистки воды от железа и марганца.** В микробиологическом способе извлечения железа из водного раствора, растворенное в воде Fe (II) окисляется до Fe (III) при помощи бактериальных клеток *Leptothix*, *Gallionella*, *Toxothix*, *Siberocystis*, *Siderocapsa spp.*, иммобилизованных в непрерывном режиме. При прохождении воды через слой носителя содержащееся в ней железо (II) под воздействием бактерий превращается в нерастворимые соединения Fe(III), которые выносятся наружу. Предлагаемый способ позволяет в непрерывном режиме и с высокой эффективностью обрабатывать большие объемы воды.

Причины накопления микроорганизмами оксидов железа и марганца (часть видов окисляет также двухвалентный марганец Mn (II)), могут быть различными:

1). Некоторые виды способны использовать органическую часть комплексных соединений, содержащих железо.

2). Возможна концентрация оксидов железа вокруг клеток микроорганизмов в результате чисто адсорбционных процессов. Это объясняется тем, что на поверхности клеток находятся отрицательно заряженные группы ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{COO}^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ), а коллоидные формы окисного железа заряжены положительно.

3). Одной из причин концентрации железа микроорганизмами является то, что они окисляют железо (II) продуктами своего метаболизма. Установлено, что некоторые бактерии относятся к *Arthrobacter*, *Leptothix*, *Metallgenium*, переводят закисное железо в окисное, так как последнее взаимодействует с перекисью водорода, которую они же и образуют.

**Аккумуляция металлов микроорганизмами.** Накопление металлов клетками микроорганизмов носит двухфазный характер:

а) начальная фаза не зависит от энергетического состояния клетки и обусловлена сорбцией металлов компонентами клеточной стенки, среди которых особенно активны как сорбенты хитин и хитозан;

б) последующая, более медленная фаза – энергозависимое внутриклеточное накопление, происходящее с участием мембранных переносчиков ионов.

Высокая сорбционная способность микроорганизмов (бактерий, мицелиальных грибов, дрожжей, водорослей) не зависит от температуры и энергетического метаболизма, что позволяет рассматривать их как эффективные и дешевые сорбенты для очистки водной среды от загрязнений [4-6].

**Целью** данного исследования было выяснение механизма сорбции растворенных форм Fe, Mn на песчаных фильтрах очистных сооружений.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать качественный и количественный состав бактерий в обрастаниях песчаных фильтров очистных сооружений водоподъемной станции ВПС-8 г. Воронежа.

2. Изучить интенсивность трансформации соединений железа и марганца различными видами железобактерий.

3. Создание лабораторной модельной установки – биореактора с использованием природных биоценозов микроорганизмов из песчаных фильтров городских станций очистки питьевой воды.

## Эксперимент

### Микробиологические методы.

Объектами исследования были пробы ила и песка (мелкая галька), отобранные на песчаных фильтрах водоочистой станции Воронежского водоочистного сооружения питьевого водоснабжения (ВПС-8). Помимо железобактерий, покрытых оксидами металлов, встречаются и другие бактериальные клетки, водоросли, простейшие.

Нижнюю часть колонок на 1/3 заполнили пробями, которые были взяты на песчаных фильтрах ВПС, оставшуюся часть заполнили в одном случае крупнозернистым песком, во втором случае - мелкозернистым песком. В верхнюю часть колонки были спущены предметные стекла для наблюдения за развитием микробных ассоциаций, участвующие в окислении двухвалентного железа и марганца. После этого через колонку был установлен проток водопроводной воды. Через 15-18 дней на предметных стеклах, на стенках колонки и в верхнем слое песка появился бурый налет. Рассмотрение этих стекол и соскобов со стенок и гальки под световым микроскопом позволило выявить на них зоны развития железобактерий.

Среди них обнаружены бактерии, относящиеся к родам *Leptothrix*, *Siderocapsa*, *Gallionella*. Кроме того в природной ассоциации поверхностных обрастаний крупнозернистого песка из песчаных фильтров доминирующее положение занимают такие железобактерии как нитчатые *Leptothrix ochraceae*; б) из одноклеточных различные морфотипы *Siderocapsa* и *Gallionella ferruginela*. Появление бурого налета на стеклах обрастания свидетельствует о том, что ассоциация микроорганизмов участвует в окислении железа и марганца в проточных условиях. Идентификацию представителей железобактерий родов *Leptothrix*, *Sphaerotilus*, *Metallogenium*, *Gallionella*, *Hyphomicrobium* по своеобразным морфологическим признакам в исследуемых осадках проводили путем микроскопического анализа в микроскопе CX 41 фирмы «Olympus» с фазово-контрастным устройством.

Перед посевом на питательные среды проводили многократное и тщательное отмывание песчаных фракций из колонки и биореактора в стерильной водопроводной воде. Метод предельных десятикратных разведений и с применением ниже указанных, стандартных питательных сред был использован для количественного учета микроорганизмов, относящихся к различным физиологическим группам и участвующих в геохимическом цикле железа и марганца в воде и песчаном фильтре установки. Культивирование бактерий проводили в пробирках Хангейта в анаэробных условиях. Среду Миерса и Нильсена [7] для анаэробных железо- и марганецредуцирующих бактерий, обладающих респираторным типом метаболизма и использующих  $Fe(OH)_3$  или  $MnO_2$  в качестве акцепторов электронов; Среду Бромфильда [8] для железо- и марганецредуцирующих бактерий с бродильным типом метаболизма; Среду Видделя с лактатом натрия [9] с добавлением ацетата натрия (0,5 г/л) использовали для сульфатредуцирующих бактерий. Количественный учет общей численности одноклеточных железо- и марганецокисляющих органотрофных бактерий производили методом посева на агаровую среду Тилера в чашки Петри с последующим подсчетом колоний, накапливающих оксиды железа или марганца [10-12].

#### **Аналитические методы.**

Колориметрическими методами на спектрофотометре СФ КФК – 3 проводили количественное определение различных форм железа и марганца в водной фазе на выходе и входе биореактора. Общее содержание  $Mn(II) + Mn(IV)$  определяли формальдоксимовым методом [7],  $Mn(IV)$  – с использованием орто-толидина [7], содержание  $Mn(II)$  – рассчитывали по разности:  $Mn\text{ общ} - Mn(IV)$ .  $Fe(II)$  определяли с  $\alpha, \alpha$  – дипиридиллом [13],  $Fe(III)$  – сульфосалициловым методом [13]. Содержание растворимого в воде кислорода определяли модифицированным микрометодом Винклера [14].

### **Обсуждение результатов**

**Краткая характеристика микробиологического состава обрастаний песчаных фильтров очистных сооружений ВПС-8 и их роль в осаждении железа.** В связи с тем, что железобактерии широко распространены в природных водах и играют важную роль в трансформации соединений железа и марганца, наряду с микробиологическими исследованиями грунтовых и поверхностных вод было проведено изучение обрастаний загрузки песчаных фильтров. Микроскопический анализ микрофлоры обрастаний песчаных фильтров показал, что

доминирующими в природной ассоциации являются следующие железобактерии: из одноклеточных – различные морфотипы *Siderocapsa* и *Gallionella*; из нитчатых форм – *Leptothrix*. Также были обнаружены такие микроорганизмы, как *Sphaerotilus*, *Metallogenium*, *Hyphomicrobium*, участвующие в превращении марганца и железа.

Помимо железобактерий, покрытых оксидами металлов, встречаются и другие бактериальные клетки, водоросли, простейшие. Ранее было показано их наличие на различных этапах водопроводной системы.

Наряду с качественным составом железобактерий в обрастаниях песчаных фильтров был проведен количественный учет микроорганизмов, развивающихся в песчаной загрузке очистных сооружений (табл. 1).

Таблица 1. Количество микроорганизмов в обрастаниях песчаных фильтров ВПС-8 ( $1 \times 10^5$  кл/г песка) ( $n=10$ ;  $p \leq 0,05$ )

Количество микроорганизмов	
Общее	Железобактерий
8,46 ± 0,37	4,58 ± 0,21

Анализ полученных результатов показал высокое содержание бактерий. Так, общее число микроорганизмов составило, в среднем,  $8,4 \cdot 10^5$  кл/г сырого песка, а количество железобактерий составило, в среднем,  $4,6 \cdot 10^5$  кл/г сырого песка. Необходимо отметить, что учитывали только жизнеспособные микроорганизмы, которые давали колонии на питательных средах. Общее количество бактериальных клеток, как живых, так и мертвых, было выше зарегистрированного.

Исходя из полученных результатов видно, что железобактерии составляют значительную долю в обрастаниях песчаных фильтров (>50% от общего числа бактерий) (табл. 2). В связи с этим, был проведен модельный опыт по изучению скорости осаждения железа в песчаной загрузке на различной глубине песчаного слоя.

Таблица 2. Скорость осаждения железа на песчаном фильтре ( $n=10$ ;  $p \leq 0,05$ )

Участок песчаной загрузки	Скорость осаждения железа, (мкг Fe <sup>3+</sup> /см <sup>2</sup> )		Количество железоредуцирующих микроорганизмов ( $\times 10^5$ ), кл.
	Через 5 дней	Через 10 дней	
1.Верхний (3 см)	5,00 ± 0,20	19,00 ± 0,75	0,45 ± 0,05
2.Средний (19 см)	2,00 ± 0,05	9,00 ± 0,38	1,05 ± 0,05
3.Нижний (40 см)	0,60 ± 0,02	7,00 ± 0,15	3,75 ± 0,15

Анализ результатов, представленных в таблице 2, показал, что наиболее интенсивно идет осаждение железа в верхнем слое песчаной загрузки. Так, за 5 суток осаждается  $5,00$  мкг/см<sup>2</sup> Fe(III), а за 10 суток –  $19,00$  мкг/см<sup>2</sup>. Наименее интенсивно осаждение железа происходит в нижнем слое песчаной загрузки и составляет  $0,60$  мкг/см<sup>2</sup> Fe(III) за 5 суток и  $7,00$  мкг/см<sup>2</sup> Fe(III) за 10 суток. Такая корреляция скорости осаждения железа в зависимости от глубины песчаного слоя связана с тем, что в нижнем слое загрузки преобладают железоредуцирующие микроорганизмы (до  $4,00 \cdot 10^5$  кл/г песка), так как здесь создаются благоприятные для их развития условия. Высокое содержание железоредуцирующих микроорганизмов в нижних слоях загрузки песчаных фильтров приводит к частичному восстановлению окисленного

железа, что обуславливает вымывание растворимого двухвалентного железа в воду, которая затем поступает в систему питьевого водоснабжения.

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что в загрузке песчаных фильтров очистных сооружений обитают типичные представители железобактерий, развивающихся при нейтральной реакции среды. Количественный учет микроорганизмов показал их высокое содержание в обрастаниях песчаных фильтров. Значительную долю от общего числа бактерий составляют железобактерии (>50%). Также была показана роль железоредукторов во вторичном загрязнении питьевой воды растворимыми формами железа.

**Состав биоценоза. Численность железобактерий в песчаном фильтре биореактора. Бактериальное и химическое осаждения Fe и Mn.** Схема модельной установки (биореактора) представлена на рис.1. Биореактор представлял стеклянную колонку объемом 2,5 л (высотой 30 см, диаметром 10,5 см). Колонка была заполнена на 1/3 объема песком, отобранным из песчаных фильтров городской станции очистки питьевой воды, содержащим природный биоценоз железо- и марганцеоксилирующих бактерий. Оставшийся объем заполняли сначала крупным, а затем мелкозернистым песком, последовательно отмытым в 1%-ной соляной кислоте и дистиллированной воде. В песок погружали предметные стекла для микроскопического анализа обрастаний. Для определения скорости процессов химического окисления растворимых соединений металлов, в качестве контроля, использовали колонку, заполненную песком без внесения фракции песка с бактериальными обрастаниями и добавлениями ингибитор дыхания  $\text{NaN}_3$  в концентрации  $1 \cdot 10^{-2}$  М для подавления активности аэробных бактерий.

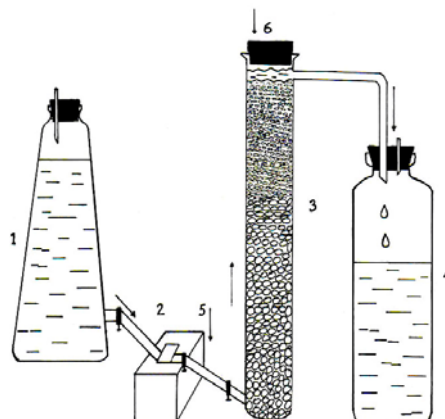


Рис. 1. Схема биореактора для удаления тяжелых металлов из воды

1 – резервуар с водопроводной водой; 2 – микронасос; 3 – песчаный фильтр; 4 – приемник воды; 5 – пробоотборник на входе воды; 6 – пробоотборник на выходе воды из биореактора

Через колонку осуществляли проток воды из резервуара, периодически заполняемого водопроводной водой из воронежской городской сети питьевого водоснабжения, в которую вносили необходимые соединения Fe и Mn. С помощью микронасоса регулировали скорость потока. Концентрации металлов в резервуаре биореактора сопоставимы с обнаруживаемыми в ряде загрязняемых природных водных источников, используемых для питьевого водоснабжения [1, 3]. Для анализа содержания исследуемых загрязнителей проводили отбор проб воды на входе и на выходе из биореактора.

Спустя 1,5 – 2 недели с момента пуска потока водопроводной воды, в которую были внесены растворимые соединения железа и марганца

(комплексорганические соединения лимоннокислого аммонийного Fe(II) и сернокислый марганец) наблюдалось обильное осаждение оксидов металлов в отмытом песке песчаного фильтра и на погруженных предметных стеклах. Микроскопический анализ и цитохимические методы окраски Fe(III) и MnO<sub>2</sub> бактериальных обрастаниях на стеклах, экспонированных в песчаном фильтре [15], позволили сделать заключения о том, что оксиды локализованы преимущественно на поверхности бактериальных клеток. В составе биоценозов доминировали железобактерии, морфологически сходные с представителями родов «*Siderocapsa*», *Leptothrix*, реже – *Gallionella* и *Hyphomicrobium*. При электронно-микроскопическом анализе образцов было обнаружено значительное количество клеток *Spirochaeta*, на клетках которых имеются отложения окислов трехвалентного железа. В литературе эта группа не указывалась, как окисляющая железо.

Посев на твердую среду Тилера методом предельных разведений в чашках Петри показал, что численность одноклеточных железобактерий составляет 3 - 5·10<sup>5</sup> клеток в смывах свежесаженных оксидов с 1 см<sup>3</sup> песка из верхнего слоя колонки реактора. Сходный состав сообществ железобактерий был обнаружен нами, как упомянуто выше, в песчаных фильтрах городской станции водоочистки г. Воронежа. На поверхности среды отмечено развитие колоний различной морфологии: точечные, крупные, концентрические с ровным или бахромчатым краем. Среди выросших микроорганизмов доминируют нитчатые железобактерии рода *Leptothrix* и одноклеточные, покрытые капсулой, бактерий типа *Siderocapsa*. В 1 г крупного песка удается учесть около 5·10<sup>5</sup> клеток микроорганизмов, окисляющих железо или марганец. В мелкозернистом песке численность микроорганизмов была несколько ниже - 3·10<sup>5</sup> клеток в 1 г. Среди них преобладает род *Micromonospora* (актиномицеты). Они образуют округлые темно-окрашенные колонии с гофрированным краем. Бактерии типа *Siderocapsa* в орудненных чехлах образуют более крупные колонии неправильной формы (лопастные).

Таким образом, в проточной установке отмечено активное развитие видов железо- и марганцеокисляющих бактерий, которые доминируют и в составе биоценоза очистных сооружений.

Соотношения скоростей биологического и химического осаждения растворимых соединений Fe и Mn из воды приведены в табл. 3. Результаты опытов свидетельствуют о том, что в пределах исходных концентраций Mn(II) 3,3 – 4,6 мг/л химического окисления марганца в контрольных вариантах не происходило за период наблюдений в течение 9 суток. По химическому окислению цитрата Fe(II) получены аналогичные результаты (табл. 3), что согласуется с известными данными об устойчивости комплексорганических соединений железа (цитрата, гуматов, ЭДТА-комплексов) к химическому окислению при нейтральных и слабощелочных значениях pH. В опытном реакторе за счет природной ассоциации бактерий осаждение новообразованных оксидов Mn, MnO<sub>2</sub>, приводило к снижению концентрации растворимого марганца ниже величин предельно допустимых концентраций по ГОСТ (ПДК). Следовательно, интенсификация процессов очистки питьевой воды от тяжелых металлов должна быть направлена на оптимизацию условий окислительной деятельности железоокисляющих бактерий.

Скорость протока воды составляла 3,0 мл/см<sup>3</sup> песка/сут. Исходное содержание растворенного кислорода в воде на входе 7,4 – 7,5 мг/л; pH 7,0 – 7,1. В качестве источника Fe (II) использовали аммонийное лимоннокислое двухвалентное железо в указанных концентрациях (мг/л). В контрольные варианты вносили 1·10<sup>-2</sup> М NaN<sub>3</sub> (химическое окисление).

Таблица 3 Соотношение скоростей процессов биологического и химического окисления Fe (II) и Mn (II) в песчаном фильтре проточной лабораторной установки

Время от начала протока, сут	Биологические процессы				Химические процессы			
	Mn(II)		Fe(II)		Mn(II)		Fe(II)	
	На входе	На выходе	На входе	На выходе	На входе	На выходе	На входе	На выходе
0	3.3	3.25	2.0	2.0	3.3	3.25	2.0	2.0
4	3.3	0.1	2.0	0.75	3.3	3.15	2.0	2.05
6*	4.6	1.25	3.0	0.1	4.6	4.45	3.0	3.05
9*	4.6	0.01	3.0	0.15	4.6	4.55	3.0	2.95

\*Анализы проводили на следующий день после увеличения концентрации металлов в резервуаре.

### Заключение

Исследована динамика и механизм трансформации форм железа и марганца в грунтовых водах на примере водоподъемной станции (ВПС-8) г. Воронежа.

Выявлено, что марганец и железо поступают, главным образом, в грунтовые воды из донных отложений и воды водохранилища, что обусловлено микробиологической редукцией окисленного марганца в глубоководных зонах, характеризующихся восстановительным режимом.

Показана негативная роль Воронежского водохранилища, проявляющаяся в увеличении численности микроорганизмов при формировании бактериологического состава грунтовой воды, в частности железобактерий.

На основании результатов микроскопического анализа образцов из песчаных фильтров можно сделать вывод, что природная ассоциация богата разнообразными железозакисляющими микроорганизмами.

Полученные данные по распределению железоредуцирующих микроорганизмов в загрузке песчаных фильтров очистных сооружений позволили выявить механизм вторичного загрязнения железом воды, предназначенной для питьевого водоснабжения. Это дает возможность модифицировать технологический режим эксплуатации очистных сооружений и повысить эффективность их функционирования.

Песчаные биофильтры при правильном режиме эксплуатации способны интенсивно удалять растворимые соединения железа, марганца из воды за счет микробиологических окислительных и сорбционных процессов. Наибольшего внимания при совершенствовании работы существующих и разрабатываемых способов водоочистки городского водоснабжения заслуживает оптимизация кислородного режима функционирования биофильтров и строгий контроль за его соблюдением.

### Список литературы

1. Грабович М.Ю., Дубинина Г.А., Букреева В.Ю. и др. Формирование микробиологического состава песчаных фильтров водоподъемных станций // Организация и регуляция физиолого-биохимических процессов ВГУ. 2008. Вып.10. С. 298–303.



2. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 С.
3. Дубинина Г.А., Грабович М.Ю., Чурикова В.В. и др. Исследование микробиологической трансформации Mn и Fe в поверхностных и грунтовых водах водозаборных зон // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 4. С. 484–491.
4. Жарков В.В., Бахитов Т.Б. Сорбенты для очистки воды // Экол. аспекты гидравл. М.: Всес. проект.-изыскат. и н.-и. об.-ние. «Союзводопроект». 1990. С. 40–43.
5. Саванина Я.В., Лебедева А.Ф., Гусев М.В. Способность цианобактерий и микроводорослей к накоплению тяжелых металлов и возможность их использования для очистки водной среды // Вестн. Моск. Ун-та., сер. 16, Биология. 1999. № 3. С. 3–12.
6. Трахтенберг И.М., Колесников В.С., Луковенко В.П. Тяжелые металлы во внешней среде. Минск.: Навука і Тэхніка, 1994. 288 С.
7. Bromfield S.M. Reduction of ferric compounds by soil bacteria // J. Gen. Microbiol. 1954. V. 11. P. 1–6.
8. Седлуха С.П., Софинская О.С. Биологические методы очистки подземных вод от железа // Вода и экология: проблемы и решения. 2001. № 1. С. 13–21.
9. Myers C.R., Nialson K.N. Bacterial Mn reduction and growth with MnO<sub>2</sub> as the sole electron acceptor // Science. 1988. V. 240. № 4857. P. 1319–1325.
10. Morgan J.J. and Stumm W. Analytical chemistry of aqueous manganese // Aquatic Water Work Association. 1965. V. 57. № 1. P. 107–119.
11. Tyler P.A., Marshall K.C. Pleomorphy in stalked, budding bacteria // J. Bacteriol. 1967. V. 93. P. 1132–1136.
12. Emerson D. Microbial oxidation of Fe(II) and Mn(II) at circumneutral pH // In: Lovley DR, editor. Environmental metal-microbe interactions. Washington, DC: ASM Press. 2000. P. 31–52.
13. Менга М.Н. Железобактерии подземных вод в процессах обезжелезивания // Вестн. Бр. гос. Техн. Ун-та. Сер. Водохозяйственное стр-во и теплоэнергетика. 2006. № 2(38). С. 49–53.
14. Кузнецова Н.В., Пурдик Г.П., Большаков А.А. Сорбционно-мембранные методы в обезжелезивании природных вод // Самара: Актуал. экол.-экон. пробл. соврем. химии: Тез. докл. 9 Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. студ. и мол. ученых, посвящ. 10-летию созд. студ. об.-ния. «СИМВОЛ», 1991. С. 45.
15. Корневский А.А., Каравайко Г.И. Сорбция молибдена биомассой микроорганизмов // Микробиология. 1993. Т. 62. № 4. С. 709–717.

---

**Букреева Виктория Юрьевна** – аспирант Воронежского государственного университета, Воронеж

**Грабович Маргарита Юрьевна** – д.б.н., Воронежского государственного университета, Воронеж

**Епринцев Александр Трофимович** – д.б.н., Воронежского государственного университета, Воронеж

**Дубинина Галина Алексеевна** – д.б.н., Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва

**Bukreeva Viktoria Yu.** – graduate student, Department of Biochemistry and Cell Physiology, Voronezh State University, Voronezh, e-mail: [bukreeva-31@yandex.ru](mailto:bukreeva-31@yandex.ru)

**Grabovich Margarita Yu.** – Doctor of Biology, Department of Biochemistry and Cell Physiology, Voronezh State University, Voronezh

**Eprintcev Alexander T.** – Doctor of Biology, Department of Biochemistry and Cell Physiology, Voronezh State University, Voronezh

**Dubinina Galina A.** – Doctor of Biology S. N. Winogradsky Institute of Microbiology of Russian Academy of Sciences