

Экологические проблемы и природопользование

УДК 57.044

Е.Н. Елизарьева, Ю.А. Янбаев, А.Ю. Кулагин

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ПОЧВ И СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Проанализировано современное состояние, проблемы и перспективы развития фиторемедиации почв и сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами. Охарактеризованы основные фиторемедиационные технологии: ризо- и фитофильтрация, фитоэкстракция, фитостабилизация и фитоиспарение. Показано, что для оценки эффективности применения различных растений для фиторемедиации используются индекс толерантности, транслокационный и биоконцентрационный факторы. С использованием данных показателей составлена логическая функция выбора растений для фиторемедиации в зависимости от способа утилизации образующейся биомассы. Проанализированы основные аспекты применения фиторемедиационных технологий *in situ* посредством ирригации растений сточными водами, содержащими тяжелые металлы. Показано, что стандарты содержания металлов, поступающих со сточными водами в почву, значительно отличаются в разных странах. Проанализированы факторы, требующие контроля при использовании сточных вод для ирригации культурных растений. Приведены критерии оценки экономической эффективности фиторемедиационных процессов: уровень затрат, потребность во времени, возможность получения дополнительного экономического эффекта.

Ключевые слова: фиторемедиация, ризо- и фитофильтрация, фитоэкстракция, фитостабилизация, фитоиспарение, тяжелые металлы, аккумуляция, толерантность, токсичность, технологии *in situ* и *ex situ*, ирригация.

Загрязнение природной среды ионами тяжелых металлов представляет большую опасность для биосферы. Помимо непосредственного токсического действия на живые и растительные организмы, тяжелые металлы имеют тенденцию к накапливанию в пищевых цепях, что усиливает их опасность для человека. Попадая в водоемы, они длительное время находятся в наиболее опасной ионной форме, и, даже переходя в связанное состояние (коллоидную форму, донные осадки или другие малорастворимые соединения), в течение длительного времени продолжают представлять потенциальную угрозу. Повышенное содержание тяжелых металлов в организме приводит к заболеваниям сердечно-сосудистой системы, вызывает тяжелые формы аллергии. Кроме того, тяжелые металлы обладают эмбриотропными свойствами и являются канцерогенами [1].

Анализ широко применяемых в настоящее время методов удаления тяжелых металлов из таких природных объектов, как почвенный покров и водоемы, показывает, что они связаны с образованием большого количества токсичных шламов, являются дорогостоящими и сложными в исполнении. Поэтому актуальным является поиск и разработка методов, позволяющих извлекать экотоксиканты без дополнительной нагрузки на окружающую среду. Несомненный приоритет по эколого-экономической эффективности признается за методом фиторемедиации [2] – технологией очистки почв и промышленных сточных вод с помощью естественных и генетически измененных растений, которое образовано сочетанием двух латинских слов «phyto» – растение и «remedium» – очищать, восстанавливать [3].

Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием данного подхода [4; 5]. Так, в отчете американского агентства по защите окружающей среды за 2000 г. приводится описание 194 исследовательских проектов в области фиторемедиации, 33 (17 %) из которых посвящены очистке окружающей среды от тяжелых металлов [6]. В отечественной науке уделяется большое внимание использованию фиторемедиационных технологий для борьбы с загрязнениями тяжелыми металлами [7-11]. Однако существенная часть из них посвящена очистке почв [9-11], а в качестве модельных объектов чаще использовались представители водной растительности [7; 8]. Подходы к фиторемедиации сточных вод с помощью наземных растений практически не обобщены. Настоящая статья дает критический обзор публикаций по этой актуальной теме.

Классификация фиторемедиационных технологий. Фиторемедиация включает в себя 4 основных подхода и, соответственно, подразделяется на 4 технологии: ризо- и фитофильтрация, фитоэкстракция, фитостабилизация и фитоиспарение [13].

Ризофильтрация заключается в пропускании сточных вод через ризофильтрационные установки с гидропонно выращиваемыми высшими наземными растениями, длинная, волокнистая и густая, покрытая волосками, корневая система которых абсорбирует, концентрирует или осаждает тяжелые металлы [14]. Согласно тем же принципам осуществляется и очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью высших водных растений (макрофитов), этот метод носит название фитофильтрации [15].

Фитофильтрация сточных вод может осуществляться двумя путями:

1) в фитофильтрационной системе – пропусканием потока сточных вод с регулируемым рН, температурой и скоростью через аквариумы с растущими макрофитами [16].

2) использованием так называемых ботанических площадок, под которыми понимается широкий спектр водотоков, заросших макрофитами естественным путем или высаженных в них искусственно. Как правило, это болотистые участки с замедленными скоростями течения на пути к более крупным водным объектам [17; 18].

По мере насыщения макрофитов тяжелыми металлами загрязненная биомасса (вся или выше уровня воды) удаляется или выкашивается.

Фитозэкстракция – это выращивание в течение определенного периода времени на загрязненных участках специально подобранных видов растений для извлечения из почвы тяжелых металлов корневой системой и максимального концентрирования их в надземной биомассе [19; 20].

Фитостабилизация (или фитовосстановление) – физическая и химическая иммобилизация загрязнителей за счет их сорбции на корнях и химической фиксации с помощью различных добавок в почву для стабилизации токсичных веществ и предотвращения их распространения путем ветровой и водной эрозии; для снижения вертикальной миграции загрязнителей в подземные воды. Она может быть использована как временная стратегия снижения экологических рисков до подбора наиболее подходящей технологии очистки.

Фитоиспарение – это процесс адсорбции растениями из почвы таких металлов, как ртуть и селен, биологическое превращение их внутри растения в газообразную форму и выброс их в атмосферу. Эффект очищения обусловлен тем, что газообразная форма данных металлов является гораздо менее токсичной, например, для селена токсичность снижается в 500–600 раз [21; 22]. Несмотря на дополнительные преимущества (минимальное изменение очищаемой поверхности, минимальная потребность в обслуживании после высадки растений, предотвращение эрозионных процессов, отсутствие необходимости утилизации растительной биомассы), при использовании фитоиспарения, в отличие от других фиторемедиационных технологий, невозможно контролировать миграцию загрязнений, поступивших в среду в процессе фитоиспарения. Поэтому фитоиспарение является самой спорной фиторемедиационной технологией.

Дополнительная характеристика фиторемедиационных технологий приведена в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что каждая конкретная фиторемедиационная технология предполагает использование растений, обладающих определенными свойствами. Так, согласно теории Бейкера, по механизмам извлечения металлов выделяют 3 группы растений: аккумуляторы, индикаторы, эксклюдоры [22]. В аккумуляторах процессы извлечения металлов корнями и их транспорт в наземные части сбалансированы, в то время как в эксклюдорах, не обладающих способностью регулировать извлечение металлов, транспорт в побеги ограничен. Так, аккумуляторы извлекают большое количество металлов и транспортируют их в надземную часть в логарифмическом отношении между концентрацией металлов в почве и концентрацией металлов в побегах.

Кроме того, Бейкером был введен термин гипераккумулятор, критерием отнесения к которому является следующее содержание металлов в надземной части: более 100 мг Cd/кг, 1000 мг Ni или Cu/кг, более 10 000 мг Zn или Mn/кг сухого веса [15]. В эксклюдорах концентрация металлов в побегах мала и постоянна в широком интервале почвенных концентраций металлов до достижения определенной величины, выше которой появляется неограниченный транспорт. Индикаторы же отражают концентрацию металла в почве. Таким образом, индикаторы могут быть эффективно использованы для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами, аккумуляторы для процессов фитоэкстракции, эксклюдоры – для фитостабилизации. Растения, используемые для процессов ризо- или фитофильтрации, должны обладать свойствами, противоположными свойствам аккумуляторов – они должны накапливать металлы в корнях.

Для оценки эффективности применения различных растений для фиторемедиации используются следующие показатели: индекс толерантности, транслокационный и биоконцентрационный факторы, характеристика которых представлена в табл. 2.

Характеристика фиторемедиационных технологий

| | Выбор растений | Объект очистки |
|------------------------|---|--|
| Ризо- и фитофилт-рация | <p>Для фитофилтрации – комбинация различных видов макрофитов (плавающих, частично или полностью погруженных) для очистки всех слоев водного потока [23].</p> <p>Для ризофилтрации – наземные растения, которые создают чрезвычайно большую поверхность соприкосновения с очищаемой средой за счет разветвленной корневой системы, которые, кроме того, должны быть толерантны к металлам [24].</p> <p>Выбор растений по транслокационным свойствам определяется способом утилизации полученной загрязненной биомассы.</p> | <p>Ризофилтрация особенно эффективна при ремедиации больших объемов сточных вод, содержащих относительно низкие концентрации разных тяжелых металлов. Так, например, согласно работе [25], нормативной очистки сточной воды путем ее ризофилтрации можно достичь, если исходная концентрация тяжелых металлов не будет превышать для меди 20 ПДК, цинка и кадмия – 5...6 ПДК, марганца и кобальта – 2 ПДК.</p> |
| Фитоэкстракция | <p>Толерантность к высоким концентрациям металлов. Способность поглощать и аккумулировать высокие концентрации одновременно нескольких металлов или их отдельных видов. Эффективная транслокация металлов из корневой системы в надземную биомассу [26]. Высокая скорость роста, большая биомасса, глубоко разрастающаяся корневая система.</p> <p>Высокая сопротивляемость к болезням растениям и к вредителям. Способность к росту при применении обычной агротехники.</p> | <p>Применима для ремедиации больших площадей земель, загрязненность которых не распространяется на большие глубины. Кроме того, высокие концентрации металлов могут быть летальны для растений, поэтому степень загрязнения должна быть низкой или средней [27].</p> <p>Поверхность почвы должна быть свободна от преград типа упавших деревьев или камней, и характеризоваться топографией, позволяющей использовать агротехнику.</p> |
| Фитостабилизация | <p>Наличие у растений или веществ, которые они выделяют, способности стабилизировать загрязняющие вещества в почве за счет связывания их лигнином на клеточной стенке («лигнификация»), абсорбции почвенным гумусом с помощью растительных или микробных ферментов («гумификация»), связыванием органическими веществами или за счет других механизмов [28]. Отсутствие (или низкий уровень) транслокации загрязняющих веществ из корневой биомассы в надземную. Высокая скорость роста, плотная надземная и корневая биомасса, толерантность к металлам.</p> | <p>Наиболее эффективна для мелкодисперсных почв с высоким содержанием органических веществ. Чаще всего применяется для больших площадей с низкой или средней степенью загрязнения.</p> |
| Фитоиспарение | <p>Некоторые макрофиты обладают хорошей способностью переводить легко летучие металлы в газообразную форму. Кроме того, довольно эффективным представляется использование древесной растительности, обладающей развитой корневой системой, большой продолжительностью жизни и интенсивным производством подстилки из опавшей листвы, что способствует повышению доступности металлов в почве. Для фитоиспарения ртути используются генетически модифицированные растения, ведутся работы по созданию таких растений для фитоиспарения мышьяка.</p> | <p>Использовать данную технологию рекомендуется вдали от населенных пунктов и местах с метеорологическими условиями, способствующими быстрым процессам разложения летучих веществ [29; 30].</p> |

Таблица 2

Показатели оценки эффективности применения различных растений для фиторемедиации

| Показатели эффективности | Количественная оценка показателя | |
|---|--|---|
| | Формула | Градация |
| Толерантность к металлам | <p>Индекс толерантности:</p> $ИТ = \frac{M_{Me}}{M_k} \times 100\%,$ <p>где M_{Me} – вес сухой биомассы растения, выращенного с добавлением металлов, г; M_k – вес сухой биомассы контрольного растения, выращенного в растворе Хоаг-ланда, г. Индекс толерантности рассчитывается для побегов (ИТП), корней (ИТК) и всей биомассы в целом (ИТБ)</p> | <p>ИТ > 100% – стимулирующее воздействие; ИТ = 100% – отсутствие влияния; ИТ < 100% – угнетающее влияние анализируемых концентраций тяжелых металлов на рост растения; ИТ = 50% – минимальный желательный объем биомассы при произрастании на загрязненной среде [31].</p> |
| Транслокация металлов внутри растения | <p>Транслокационный фактор:</p> $ТФ = \frac{C_n}{C_k},$ <p>где C_n – концентрация металла в побегах, мг/г; C_k – концентрация металла в корнях, мг/г</p> | <p>Значение ТФ < 1 свидетельствует об аккумуляции металлов преимущественно в корнях, ТФ > 1 – в побегах</p> |
| Способность аккумулировать металлы (по отдельности и в смеси) | <p>Биоконцентрационный фактор:</p> $БКФ = \frac{C_{раст}}{C_{р-р}},$ <p>где $C_{раст}$ – концентрация металла в растении, мг/г; $C_{р-р}$ – концентрация металла в растворе, мг/л. Биоконцентрационный фактор рассчитывается отдельно для побегов (БКФ_п) и корней (БКФ_к)</p> | <p>Значение БКФ > 1000 является критерием отнесения растения к хорошим аккумуляторам [32]</p> |

Используя показатели, приведенные в табл. 2, можно задать критерий эффективности использования того или иного растения для целей фиторемедиации в виде логической функции $\Xi = f(ИТБ, ТФ, БКФ_{п}, БКФ_{к})$. Одной из главнейших составляющих эффективности любой природоохранной технологии является ее безотходность. Фиторемедиационные технологии приводят к образованию биомассы, загрязненной тяжелыми металлами, поэтому возможность ее утилизации является важной задачей. Формирование логической функции в зависимости от способа утилизации образующейся биомассы показано на рисунке. Показатель, входящий в формулу со знаком «+», должен стремиться к максимуму, со знаком «–» – к минимуму. Следует отметить, что данная функция Ξ не является математической зависимостью и носит только качественный характер. Тем не менее, этот подход может быть полезен при обосновании выбора конкретного растения для того или иного метода фиторемедиации с наиболее подходящим способом утилизации образующейся биомассы.

Преимущества и недостатки фиторемедиационных технологий целесообразно рассматривать в зависимости от способа их осуществления (табл. 3).

Так, по способу осуществления все вышеперечисленные технологии фиторемедиации можно разделить на 2 группы: технологии *in situ* (осуществляемые непосредственно на месте) и *ex situ* (осуществляемые на специально оборудованных площадках). Технологией *ex situ* является ризофилтрация, осуществляемая в специально сооруженных резервуарах.

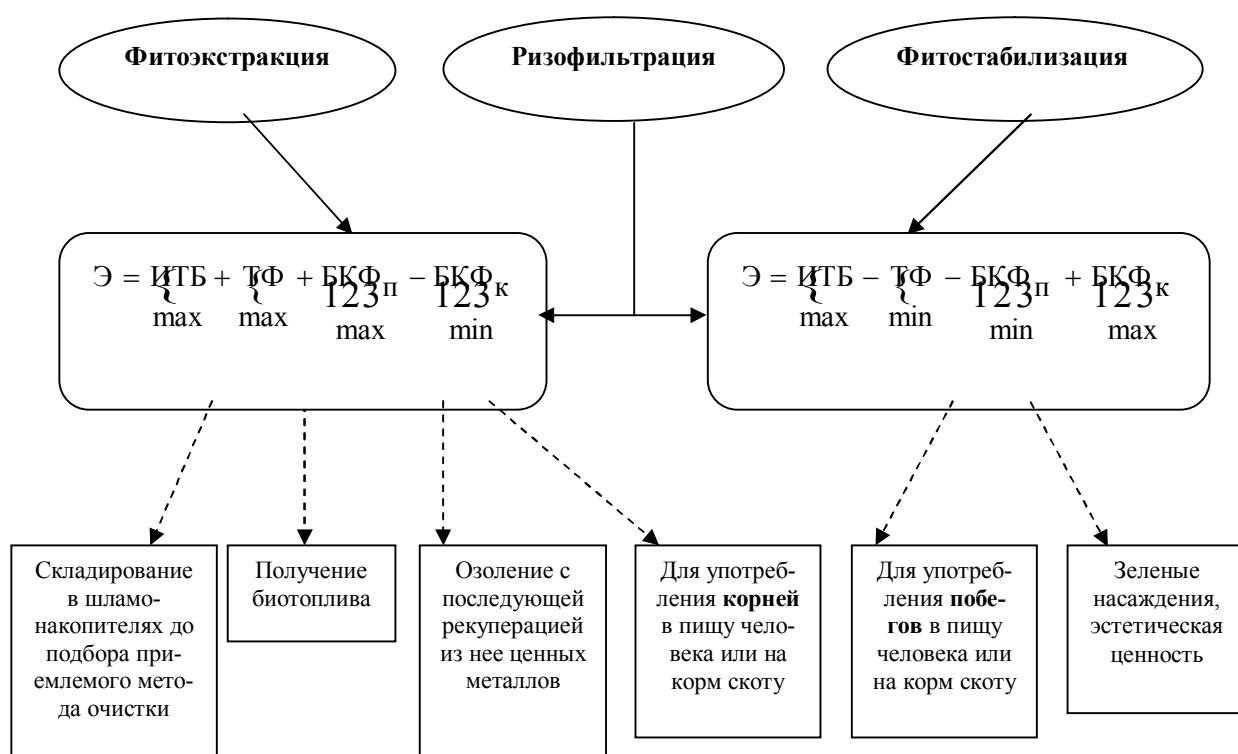


Рис. Функция эффективности фиторемедиационных технологий в зависимости от способа утилизации биомассы

К технологиям *in situ* относятся фитоэкстракция, фитостабилизация, фитоиспарение, фитофилтрация на болотистых участках, заросших макрофитами, ризофилтрация, осуществляемая плавающими платформами на прудах. Очистка сточных вод с помощью фитостабилизации, фитоиспарения и фитофилтрации осуществляется использованием загрязненных сточных вод (с изначально средним или низким уровнем содержания тяжелых металлов или предварительно разбавленных/очищенных до этого уровня) для ирригации почвы [33].

Применение фиторемедиационных технологий *in situ* посредством ирригации растений сточными водами, содержащими тяжелые металлы. Применение сточных вод, содержащих тяжелые металлы, для ирригации пастбищных культур, используемых на корм скоту, или овощных насаждений, употребляемых человеком в пищу, является довольно проблемным и неоднозначно оцениваемым методом утилизации сточных вод. Так, например, в Зимбабве законодательно запрещено использовать сточные воды для ирригации ягодных, овощных и салатных культур, которые используются в пищу в сыром виде. В странах европейского сообщества этот вопрос был решен не путем запрета на использование сточных вод для ирригации, а путем принятия распоряжения ЕС (86/278) по защите окружающей среды при использовании сточных вод и их осадков в сельском хозяйстве, предписывающего предельные концентрации тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Некоторые страны вносят свои дополнения в этот документ, устанавливая, таким образом, свои собственные стандарты, не противоречащие этому документу. Так, в Голландии установлены наиболее жесткие требования, в Великобритании они мягче, и заключаются в обязательном мониторинге почв до и после ирригации их сточными водами. Кроме того, британские стандарты учитывают pH почвы как основной фактор, влияющий на извлечение тяжелых металлов растениями. Так, максимально разрешенный уровень содержания меди при pH < 5,5 равен 50 мг/кг, а при pH 5,5 ÷ 6 он составляет 100 мг/кг. В литературе также приводятся данные о стандартах США и Великобритании (табл. 4), которые предусматривают пролонгирование процесса использования почвы в качестве обеззараживающего фильтра путем стандартизации количества тяжелых металлов, поступающих в почву, в расчете на гектар площади в год [34-36].

Таблица 3

Преимущества и недостатки фиторемедиационных технологий очистки сточных вод

| Преимущества | Технология | | Недостатки | Технология | |
|--|----------------|----------------|--|----------------|----------------|
| | <i>In situ</i> | <i>Ex situ</i> | | <i>In situ</i> | <i>Ex situ</i> |
| Положительное восприятие общественностью | + | + | Наличие концентрационных пределов применимости технологии | + | + |
| Эстетическая ценность зеленого покрова очищаемой поверхности | + | - | Зависимость от глубины распространения загрязнений | + | - |
| Способность очищать большие объемы сточных вод | + | + | Зависимость от геологической характеристики очищаемой поверхности (глубина протекания подземных вод; глубина водоемов; структура и проницаемость почв) | + | - |
| Питание солнечной энергией | + | - | Невозможность регулирования ряда абиотических факторов среды (погодные условия, уровень влагопотребления) | + | - |
| Отсутствие потребности в трудоемких операциях по обслуживанию ремедиационной системы | + | - | Долговременность процесса очистки | + | - |
| Сравнительно невысокая стоимость (% от стоимости традиционных технологий) | + | + | Трудоемкость оценки целесообразности применения данной технологии из-за необходимости учета конкретных почвенно-климатических условий | + | - |
| Возможность утилизации биомассы растений с получением дополнительного экономического эффекта | + | + | Вероятность распространения загрязняющих веществ по пищевой цепи, например, из-за потребления животными растений в пищу | + | - |

Примечание. «+» наличие; «-» отсутствие.

В России гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения приведены в СанПин 2.1.7.573-96¹, согласно которому сточные воды, содержащие микроэлементы, в том числе и тяжелые металлы, в количествах, не превышающих ПДК для воды хозяйственно-питьевого водопользования, могут использоваться для орошения без ограничений.

Таблица 4

Стандарты содержания металлов, поступающих со сточными водами в почву, (кг/га в год)

| № п/п | Металл | Стандарт Великобритании | Стандарт США |
|-------|--------|-------------------------|--------------|
| 1 | Кадмий | 0,15 | 0,02 |
| 2 | Медь | 7,5 | 4,0 |
| 3 | Цинк | 15,0 | 40,0 |
| 4 | Никель | 3,0 | 4,0 |
| 5 | Свинец | 15,0 | 100 |
| 6 | Хром | 15,0 | - |

¹ СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения». М., 1997.

Таблица 5

Факторы, требующие контроля, при использовании сточных вод для ирригации культурных растений

| Факторы | Влияние |
|------------------------------|---|
| Физические | |
| Аэрация почвы и избыток воды | – содержание воздуха <10% по объему ингибирует рост растений; – повышает мобильность некоторых тяжелых металлов (например, марганца и железа) в анаэробных условиях |
| Взвешенные вещества | – образуют слой с высоким гидравлическим сопротивлением, что ухудшает инфильтрационные характеристики почвы; – содержат высокую долю органических веществ, что обуславливает значительное потребление кислорода; – вызывают засорение отверстий ирригационной системы |
| Химические | |
| Соленость | – может негативно влиять на урожайность в зависимости от растения (актуально для засушливых, полусушливых и прибрежных зон) |
| Натрий, хлор | – адсорбция натрия снижает проницаемость почвы; – повышенное содержание натрия и хлора вызывает повреждения листьев и снижение урожайности |
| Бор | – характеризуется незначительной разницей между необходимым содержанием в организме и токсическим уровнем; – загрязняет подземные воды вследствие высокой проникающей способности |
| Литий, селен | – литий характеризуются незначительной разницей между необходимым содержанием в организме и токсическим уровнем; – избыток селена приводит к специфическим заболеваниям крупного рогатого скота |
| Кальций, магний | – кальций образует белый налет на надземных частях растений; – повышенное содержание магния приводит к засорению отверстий ирригационной системы |
| Азот | – в определенных концентрациях является необходимым для нормального роста элементом, увеличивает сочность некоторых культур; – влияет на вкусовые качества (высокое содержание снижает содержание сахара в растениях); – в больших концентрациях замедляет рост, цветение и плодоношение; – нитраты токсичны для человека и животных |
| Фосфор и калий | – благоприятно влияют на рост растений, однако необходимо учитывать их содержание в ирригационных водах при расчете количества удобрений; |
| Тяжелые металлы | – в определенных концентрациях являются необходимыми элементами питания человека и животных; – в высоких концентрациях токсичны для растений, человека и животных; – не поддаются разложению, способны перемещаться по пищевым цепям |
| Фтор | – токсичен в высоких концентрациях в кислых почвах с низким содержанием кальция |
| Биологические | |
| Патогенные микроорганизмы | – вызывают инфекционные заболевания (холеру, тиф, дизентерию), погибают при кулинарной обработке овощных культур |
| Вирусы | – вызывают вирусные заболевания, удаляются третичной очисткой сточных вод и периодическим подсушиванием почвы для улучшения роста аэробных бактерий |

Целый ряд примеров практического применения сточных вод для ирригации овощных культур свидетельствует об относительной безопасности данного метода для окружающей среды при условии правильной организации его использования, подразумевающей учет всех факторов, которые могут прямо или косвенно влиять на окружающую среду (табл. 5). Так, например, ирригация сточными во-

дами в Пенсильвании (США) была не только сравнительно безопасной для окружающей среды, но и способствовала повышению урожая, так как сточные воды выступали не только в качестве ирригационного агента, но и в качестве удобрения. Предотвращение контакта ирригационных и подземных вод достигалось подачей воды в объемах, не превышающих инфильтрационную емкость почвы.

Ряд экспериментов в тепличных условиях показал, что содержание цинка и меди в пшенице и гречихе достигает токсического уровня при содержании их, превышающем рекомендованные уровни (25 мг/л) в 12,5 раз для цинка и в 125 для меди. Отмечено, что при поступлении этих металлов в концентрациях, характерных для сточных вод промышленных предприятий Канады, прошедших предирригационную очистку (0,08 мг/л), сточные воды будут являться источниками необходимых для роста растений микроэлементов. Кроме того, было установлено, что уровень аккумуляции меди и цинка в корнях в 20 раз превышает этот уровень в побегах и зернах. Очевидно, что предотвращение поедания скотом корневой части является необходимой мерой исключения поступления избыточных уровней тяжелых металлов в пищевую цепочку, что может быть достигнуто, например, выкашиванием биомассы и последующим ее использованием в корм, а не непосредственным выпасом на данном пастбище.

Кроме того, содержание тяжелых металлов в овощах значительно снижается при кулинарной обработке [37]. Так, в результате очистки, промывания, снятия кожуры и бланшировки количество свинца и ртути снижается на 50 % в овощах и на 80–85 % в картофеле, а кадмия – на 20 %. Уменьшение содержания свинца при однократном промывании салата может достигать 30–70 %.

Существенно снизить опасность при использовании в пищу биомассы, содержащей тяжелые металлы, позволяет учет особенностей распределения тяжелых металлов в отдельных зонах и тканях различных органов растений. Это позволяет оценить опасность металлов в зависимости от объема, который они занимают в данном органе и дает основание для механического удаления опасной части органа. Например, для тыквы характерно повышенное содержание тяжелых металлов в верхней части, прилегающей к плодоножке, в нижней же части плодов их содержится в 1,5–4 раза меньше [37].

Таким образом, учет особенностей аккумуляции тяжелых металлов в растениях и тщательный контроль за содержанием тяжелых металлов в продуктивных (съедобных) частях растений позволяет использовать полученную в результате процесса фиторемедиации загрязненную биомассу в корм животным или в пищу человека [38; 39]. Это не только повышает экономическую эффективность фиторемедиационных технологий, но и делает их практически безотходными. Дальнейшее исследование фиторемедиационной технологии представляет несомненный интерес, так как можно обеспечить как глубокую доочистку сточных вод, так и использование воды, содержащей тяжелые металлы, для повышения урожайности сельскохозяйственных культур [40].

Экономическая эффективность фиторемедиационных процессов

Для выполнения оценки экономической эффективности фиторемедиационных процессов следует охарактеризовать некоторые аспекты, а именно уровень затрат, потребность во времени, возможность получения дополнительного экономического эффекта. Рассмотрим их подробнее.

Затраты. При использовании технологии *in situ*, а именно ирригации сточными водами участка почвенной поверхности, засаженного растениями, отсутствуют затраты на энергообеспечение, кроме того не требуется специальное оборудование, т.к. используется только стандартная агротехника. Этот фактор вместе с отсутствием необходимости выполнения трудоемких операций по обслуживанию фиторемедиационной системы приводит к конкурентоспособной стоимости данных технологий по сравнению с традиционными методами.

При использовании технологии *ex situ* стоимость очистки повышается в виду довольно высоких накладных расходов, связанных с потребностью в дополнительных мощностях и специализированном оборудовании, высококвалифицированном персонале для обеспечения эффективного функционирования систем гидропонного выращивания растений и непосредственно самих ризофилтрационных установок. Тем не менее, стоимость данной технологии очистки все равно остается одной из минимальных (табл. 6). Кроме того, если ризофилтрационный резервуар является крытым и оборудован устройствами поддержания необходимых микроклиматических условий, то это позволяет устранить один из основных недостатков фитофилтрационных технологий – сезонность применения.

Потребность во времени. Для осуществления процесса фиторемедиации необходимо много времени, в течение которого очищаемая среда выведена из хозяйственного оборота. Однако опыт практического использования фитоэкстракции показал, что этот фактор все же компенсируется более низкими затратами по сравнению с затратами на традиционно применяемые технологии (табл. 7).

Таблица 6

Сравнительная характеристика стоимости фиторемедиационной очистки сточных вод

| Метод очистки | Стоимость (долларов на м ³ очищенной воды) |
|----------------------------------|--|
| Адсорбция на активированном угле | 25–45 |
| Биосорбция | 2–750 |
| Обратный осмос | 0,7 |
| Адсорбция | 0,2–4,4 |
| Мембранное разделение-фильтрация | 0,2–1,3 |
| Ризофильтрация | <0,2–1,3 |
| Ионный обмен | <0,2–0,4 |
| Химическое осаждение | <0,2–0,4 |

Таблица 7

Стоимостные преимущества фитоэкстракции тяжелых металлов

| Технология очистки | Стоимость (доллар/м ³) | Необходимое время (месяц) | Дополнительные факторы, увеличивающие расходы | Проблемы безопасности |
|--|---------------------------------------|------------------------------|---|---|
| Фиксация с помощью почвенных добавок | 90–200 | 6–9 | Снятие почвенного слоя, транспортировка Долгосрочный мониторинг | Вероятность выщелачивания |
| Складирование на свалках | 100–400 | 6–9 | Долгосрочный мониторинг | Вероятность выщелачивания |
| Экстракция, выщелачивание | 250–500 | 8–12 | Образование дополнительных отходов | Необходимость утилизации концентратов |
| Фитоэкстракция | 15–40 | 18–60 | Долгосрочное изъятие земель из хозоборота | Необходимость утилизации биомассы |

Возможность получения дополнительного экономического эффекта. Этот фактор связан с тем, что полученная высушенная растительная биомасса может быть не только складирована в шламонакопителях до подбора приемлемого метода обработки, но и может быть использована для рекуперации из нее ценных цветных металлов путем озоления и последующей обработки, например, раствором серной кислоты; для получения метана в результате сбраживания биомассы в метантенках и обеспечения энергией ризофильтрационной установки. Кроме того, довольно перспективной является возможность использования биомассы в пищу животными или человеком при условии тщательного контроля содержания металлов в съедобных частях. Для безопасного внедрения этого способа использования биомассы необходимо тщательное изучение особенностей аккумуляции тяжелых металлов в растениях.

Заключение

Таким образом, фиторемедиационные технологии представляют несомненный интерес, так как с их помощью можно обеспечить как глубокую доочистку сточных вод, так и использование воды, содержащей тяжелые металлы, для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Кроме того, учет особенностей аккумуляции тяжелых металлов в растениях и тщательный контроль над содержанием тяжелых металлов в продуктивных (съедобных) частях растений позволяет использовать полученную в результате процесса фиторемедиации загрязненную биомассу в корм животным или в пищу человека. Это не только повышает экономическую эффективность фиторемедиационных технологий, но и делает их практически безотходными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодин Б.А. Тяжелые металлы и здоровье человека // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 4. С.18-20.

2. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Русских М.Л., Валиев Р.Ш., Арефьева О.А. Фиторемедиационные энерго-сберегающие технологии в решении проблем загрязнения гидросферы // Инновации: Теория и практика. 2012. Вып. 2 (9). С.166-172.
3. Pulford I.D., Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review // Environment International. 2003. № 29. P. 529-540.
4. Prasad M. N. V. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization // Russian Journal of Plant Physiology. Vol. 5. № 5. 2003. P. 686-700.
5. Елизарьев А.Н., Насыров А.Н., Насырова Э.С. Комплексная оценка экологического состояния водоемов урбанизированных территорий (на примере г. Уфа) // Вода: химия и экология. 2015. № 9. С. 3-11.
6. Guide to documenting and managing cost and performance information for remediation projects // EPA 542-F-05-004, 2005. URL: <http://www.frtr.gov>. (дата обращения: 18.02.2016).
7. Минаева О.М., Акимова Е.Е., Минаев К.М., Семенов С.Ю., Писарчук А.Д. Поглощение ряда тяжелых металлов из водных растворов растениями водного гиацинта (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) // Вестн. Томского гос. ун-та. 2009. № 4 (8). С. 106-112.
8. Тарушкина Ю.А., Ольшанская Л.Н., Мечева О.Е., Лазуткина А.С. Высшие водные растения для очистки сточных вод // Экология и промышленность России. ЭКиП. 2006. №5. С. 36-39.
9. Киреева Н.А., Григориади А.С., Багаутдинов Ф.Я. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С.4-10.
10. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851-868.
11. Копчик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113-1130.
12. Вдовина И.В., Смирнова Т.П. Доочистка сточных вод горно-обогатительного комбината с использованием элементов природно-техногенных ландшафтов // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 11. С. 17-22.
13. Dushenkov V., Nanda Kumar P.B.A., Motto H., Raskin I. Rhiofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams // Environ. Sci. Technol. 1995. № 29. P. 1239-1245.
14. Vlyssides A., Barampouti E.M., Mai S. Heavy metal removal from water resources using the aquatic plant *Apium nodiflorum* // Communication in soil science and plant analysis. 2005. № 36. P.1-7.
15. Kamal M., Ghaly A.E., Mahmoud N., Côté R. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants // Environment International. 2004. № 29. P.1029-1039.
16. Эйнояр Л.О. Ботаническая площадка – биоинженерное сооружение для доочистки сточных вод // Водные ресурсы. 1990. № 4. С. 149-161.
17. Nanda Kumar P.B.A., Dushenkov V., Motto H., Raskin I. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils // Environ. Sci. Technol. 1995. № 29. P. 1232-1238.
18. Елизарьев А.Н. Оценка антропогенного воздействия на гидроэкологический режим водных объектов: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2007. 25 с.
19. Marchiol L., Assolari S., Sacco P., Zerbi G. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil // Environmental Pollution. 2004. № 132. P. 21-27.
20. Schnoor J.L. Technology evaluation report «Phytoremediation of soil and groundwater» // Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. 2002. 52 p.
21. Lasat M.M. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues // Journal of Hazardous Substance Research. 2000. Vol. 2. P. 5-25.
22. Cao A., Cappai G., Carucci A., Muntoni A. Selection of plants for zinc and lead phytoremediation // Journal of Environmental Science and Health. 2004. Vol. A39, № 4. P. 1011-1024.
23. Arthur E.L. et al. Phytoremediation – an overview // Critical Reviews in Plant Sciences. 2005. № 24. P. 109-122.
24. Qu R.L., Li D., Du R., Qu R. Lead uptake by roots of four turfgrass species in hydroponic cultures // HortScience. P. 2003. № 38(4). P. 623-626.
25. Золотухин И.А., Никулина С.Н., Федосеева Л.А. Снижение концентрации микроэлементов в водной среде под воздействием корневых систем // Экология. 1995. № 3. С. 248-249.
26. Kim I.S., Kang K.H., Johnson-Green P., Lee E.J. Investigation of heavy metal accumulation in *Polygonum thunbergii* for phytoextraction // Environmental Pollution. 2003. № 126. P. 235-243.
27. Robinson B., Fernández J.E., Madejón P., Marañón J.E., Murillo J.M., Green S., Clothier B. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability // Plant and Soil. 2003. № 249. P. 117-125.
28. Lasat M. M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms // J. Environ. Qual. 2002. № 31. P.109-120.
29. Suresh B., Ravishankar G.A. Phytoremediation – A novel and promising approach for environmental clean-up // Critical Reviews in Biotechnology. 2004. № 24(2–3). P. 97-124.
30. Afanasev I., Volkova T., Elizaryev A., Longobardi A. Analysis of interpolation methods to map the long-term annual precipitation spatial variability for the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // WSEAS Transactions on Environment and Development. 2014. Т. 10, № 1. С. 405-416.

31. Ali N. A., Berna M.P., Ater M. Tolerance and bioaccumulation of cadmium by *Phragmites australis* grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc // *Aquatic Botany*. 2004. Vol. 80. P. 163–176.
32. Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Садунишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука, 2005. 199 с.
33. Haruvy N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1997. Vol. 66. P. 113-119.
34. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
35. Tani F.H., Barrington S. Zinc and copper uptake by plants under two transpiration rates. Part I. Wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Environmental Pollution*. 2005. Vol.138. P. 538-547.
36. Mapanda F., Mangwayana E.N., Nyamangara J., Giller K.E. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2005. Vol.107. P.151-165.
37. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология / под ред. В.А. Черникова, А.И. Черкереса. М.: Колос, 2000. 536 с.
38. Madyiwa S., Chimbari M.J., Schutte C.F., Nyamangara J. Greenhouse studies on the phyto-extraction capacity of *Cynodon nlemfuensis* for lead and cadmium under irrigation with treated wastewater // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2003. № 28. P. 859-867.
39. Emongor V.E., Ramolemana G.M. Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004. № 29. P. 1101-1108.
40. Kiiashko L.Yu., Elizariiev A.N., Afanasiev I.A., Elizariieva E.N. Method of estimating the water potential of the territory // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. North Charleston, USA. Изд-во: CreateSpace, 2016. С. 7-10.

Поступила в редакцию 06.04.16

E.N. Elizareva, Yu.A. Yanbaev, A.Yu. Kulagin

SELECTION OF PHYTOREMEDIATION TECHNOLOGIES OF HEAVY METAL-CONTAMINATED LAND AND WASTEWATER

The current state, problems and prospects of phytoremediation of soil and waste water contaminated with heavy metals are reviewed. The main phytoremediation technologies are described: rhyzo- and phytofiltration, phytoextraction, phytostabilization and phytovolatilization. It is shown that tolerance index, as well as translocation and bioconcentration factors are used to estimate the efficiency of different plants for phytoremediation. Using these indicators the logical function of plant selection for phytoremediation depending on the resulting biomass disposal has been suggested. The main aspects of the application of phytoremediation technology in situ by irrigation with treated wastewater have been analyzed. It is shown that maximum permitted limits of heavy metals concentrations in wastewater irrigated soils differ considerably in different countries. The factors that need to be controlled when using wastewater for irrigation in horticultural crop production are described. Evaluation criteria of economic efficiency of phytoremediation processes are given: level of costs, time demand, possibility of obtaining an additional economic benefit.

Keywords: phytoremediation, rhyzo- and phytofiltration, phytoextraction, phytostabilization, phytovolatilization, heavy metals, accumulation, tolerance, toxicity, *in situ* and *ex situ* technologies, irrigation.

REFERENCE

1. Jagodin B.A. [Heavy metals and human health], in *Himija v sel'skom hozjajstve*, 1995, no. 4, pp.18-20 (in Russ.).
2. Ol'shanskaja L.N., Sobgajda N.A., Russkih M.L., Valiev R.Sh. and Aref'eva O.A. [Phytoremediation energy-saving technology in solving problems of pollution of the hydrosphere], in *Innovacii: Teorija i praktika*, 2012, iss. 2 (9), pp. 166-172 (in Russ.).
3. Pulford I.D. and Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review, in *Environment International*, 2003, no. 29, pp. 529-540.
4. Prasad M.N.V. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization, in *Russian Journal of Plant Physiology*, vol. 5, no. 5, 2003, pp. 686-700.
5. Elizariiev A.N., Nasyrov A.N. and Nasyrova E.S. [Comprehensive assessment of the ecological status of water bodies in urban areas (for example, Ufa)], in *Voda: himija i ekologija*, 2015, no. 9, pp. 3-11 (in Russ.).
6. Guide to documenting and managing cost and performance information for remediation projects, in *EPA 542-F-05-004*, 2005, Available at: <http://www.frtr.gov>. (accessed: 18.02.2016).
7. Minaeva O.M., Akimova E.E., Minaev K.M., Semenov S.Ju. and Pisarchuk A.D. [The absorption of a number of heavy metals from aqueous solutions of plants water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)], in *Vestn. Tom'skogo Gos. Univ.*, 2009, no. 4 (8), pp. 106-112 (in Russ.).

8. Tarushkina Ju.A., Ol'shanskaja L.N., Mecheva O.E. and Lazutkina A.S. [Higher aquatic plants for sewage treatment], in *Ekologija i promyshlennostj Rossii*, ЕКiP, 2006, no. 5, pp. 36-39 (in Russ.).
9. Kireeva N.A., Grigoriadi A.S. and Bagautdinov F.Ja. [Phytoremediation as a way to cleanse soils contaminated by heavy metals], in *Teoreticheskaja i prikladnaja ekologija*, 2011, no. 3, pp. 4-10 (in Russ.).
10. Kopcik G.N. [Modern approaches to remediation of soils contaminated with heavy metals (review)], in *Pochvovedenie*, 2014, no. 7, pp. 851-868 (in Russ.).
11. Kopcik G.N. [Problems and prospects of phytoremediation of soils contaminated by heavy metals (review)], in *Pochvovedenie*, 2014, no. 9, pp. 1113-1130 (in Russ.).
12. Vdovina I.V. and Smirnova T.P. [Tertiary treatment of wastewater mining and processing plant with elements of natural and man-made landscapes], in *Bezopasnostj zhiznedateljnosti*, 2014, no. 11, pp. 17-22 (in Russ.).
13. Dushenkov V., Nanda Kumar P.B.A., Motto H. and Raskin I. Rhiofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams, in *Environ. Sci. Technol.*, 1995, no. 29, pp. 1239-1245.
14. Vlyssides A., Barampouti E.M. and Mai S. Heavy metal removal from water resources using the aquatic plant *Apium nodiflorum*, in *Communication in soil science and plant analysis*, 2005, no. 36, pp.1-7.
15. Kamal M., Ghaly A.E., Mahmoud N. and Côté R. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants, in *Environment International*, 2004, no. 29, pp.1029–1039.
16. Ejnor L.O. [Botanical Playground – bioengineering facility for purification of waste water], in *Vodnye resursy*, 1990, no. 4, pp. 149–161 (in Russ.).
17. Nanda Kumar P.B.A., Dushenkov V., Motto H. and Raskin I. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils, in *Environ. Sci. Technol.*, 1995, no. 29, pp. 1232-1238.
18. Elizar'ev A.N. [Assessment of anthropogenic impact on water bodies hydroecological mode], Abstract of diss. Cand. geogr. sci., Sankt-Peterburg, 2007, 25 p. (in Russ.).
19. Marchiol L., Assolari S., Sacco P. and Zerbi G. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil, in *Environmental Pollution*, 2004, no. 132, pp. 21-27.
20. Schnoor J.L. Technology evaluation report «Phytoremediation of soil and groundwater», in *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*, 2002, 52 p.
21. Lasat M.M. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues, in *Journal of Hazardous Substance Research*, 2000, vol. 2, pp. 5-1 – 5-25.
22. Cao A., Cappai G., Carucci A. and Muntoni A. Selection of plants for zinc and lead phytoremediation, in *Journal of Environmental Science and Health*, 2004, vol. A39, no. 4, pp. 1011–1024.
23. Arthur E.L. et al. Phytoremediation – an overview, in *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, no. 24, pp. 109–122.
24. Qu R.L., Li D., Du R. and Qu R. Lead uptake by roots of four turfgrass species in hydroponic cultures, in *HortScience*, 2003, no. 38(4), pp. 623-626.
25. Zolotuhin I.A., Nikulina S.N. and Fedoseeva L.A. [Reducing the concentration of micronutrients in an aqueous medium under the influence of root system], in *Ekologija*, 1995, no. 3, pp. 248 – 249 (in Russ.).
26. Kim I.S., Kang K.H., Johnson-Green P. and Lee E.J. Investigation of heavy metal accumulation in *Polygonum thunbergii* for phytoextraction, in *Environmental Pollution*, 2003, no. 126, pp. 235–243.
27. Robinson B., Fernández J.E., Madejón P., Marañón J.E., Murillo J.M., Green S. and Clothier B. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability, in *Plant and Soil*, 2003, no. 249, pp. 117–125.
28. Lasat M.M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms, in *J. Environ. Qual.*, 2002, no. 31, pp.109–120.
29. Suresh B. and Ravishankar G.A. Phytoremediation – A novel and promising approach for environmental clean-up, in *Critical Reviews in Biotechnology*, 2004, no. 24(2–3), pp. 97–124.
30. Afanasev I., Volkova T., Elizaryev A. and Longobardi A. Analysis of interpolation methods to map the long-term annual precipitation spatial variability for the Republic of Bashkortostan, Russian Federation, in *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 405-416.
31. Ali N.A., Berna M.P. and Ater M. Tolerance and bioaccumulation of cadmium by *Phragmites australis* grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc, in *Aquatic Botany*, 2004, vol. 80, pp. 163–176.
32. Kvesitadze G.I., Hatisashvili G.A., Sadunishvili T.A. and Evstigneeva Z.G. *Metabolizm antropogennyh toksikantov v vysshih rastenijah* [Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants], M.: Nauka, 2005, 199 p. (in Russ.).
33. Haruvy N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis, in *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, vol. 66, pp. 113-119.
34. Alekseev Ju.V. *Tjazhelye metally v pochvah i rastenijah* [Heavy metals in soils and plants], L.: Agropromizdat, 1987, 142 p. (in Russ.).
35. Tani F.H. and Barrington S. Zinc and copper uptake by plants under two transpiration rates. Part I. Wheat (*Triticum aestivum* L.), in *Environmental Pollution*, 2005, vol.138, pp. 538–547.
36. Mapanda F., Mangwayana E.N., Nyamangara J. and Giller K.E. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe, in *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, vol.107, pp.151–165.

37. Chernikov V.A., Aleksahin R.M. and Golubev A.V. *Agroekologija* [Agroecology], M.: Kolos, 2000, 536 p. (in Russ.).
38. Madyiwa S., Chimbari M.J., Schutte C.F. and Nyamangara J. Greenhouse studies on the phyto-extraction capacity of *Cynodon nlemfuensis* for lead and cadmium under irrigation with treated wastewater, in *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, no. 28, pp. 859–867.
39. Emongor V.E. and Ramolemana G.M. Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana, in *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, no. 29, pp. 1101–1108.
40. Kiiashko L.Yu., Elizariev A.N., Afanasiev I.A. and Elizarieva E.N. Method of estimating the water potential of the territory, in *Materialy VIII mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. «Aktual'nye napravlenija fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij»*, North Charleston, USA, Izd-vo: CreateSpace, 2016, pp. 7-10.

Елизарьева Елена Николаевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и охраны
окружающей среды»
E-mail: elizareva_en@mail.ru

Янбаев Юлай Аглямич,
доктор биологических наук, профессор, проректор
по учебной работе, заведующий кафедрой
«Безопасность жизнедеятельности и охраны
окружающей среды»
E-mail: yanbaev_ua@mail.ru

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
450074, Россия, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32

Кулагин Алексей Юрьевич,
доктор биологических наук, профессор,
заведующий лабораторией лесоведения
Уфимский институт биологии РАН
450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 69
E-mail: coolagin@list.ru

Elizareva E.N.,
Candidate of Technical science,
Associate Professor at Department of Life Safety
and Environmental Protection
E-mail: elizareva_en@mail.ru

Yanbaev Yu.A.,
Doctor of Biology, Professor, Vice-rector,
Head of Department of Life Safety
and Environmental Protection
E-mail: yanbaev_ua@mail.ru

Bashkir State University
Z. Vally st., 32, Ufa, Russia, 450074

Kulagin A.Yu.,
Doctor of Biology, Professor,
Head of the forestry laboratory
Ufa Institute of biology
of the Russian Academy of Sciences
Oktyabrya av., 69, Ufa, Russia, 450054
E-mail: coolagin@list.ru