

ФИТОИНДИКАЦИЯ И ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

А.У. Исаева, А.А. Ешибаев

Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова

Загрязнение почв тяжелыми металлами остается одной из приоритетных экологических проблем Южного Казахстана. Установлено, что из-за процессов водной и ветровой эрозии содержание ионов свинца и кадмия в почвах районов г. Шымкент, прилегающих к месту складирования свинцово-цинковых шлаков, превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) до $453,3 \pm 34,7$ раза. Основной целью исследований было изучение возможности фитоиндикации и фиторемедиации почв Южного Казахстана, загрязненных тяжелыми металлами. Выявлено, что в условиях аридного климата юга Казахстана наибольшая концентрация ионов тяжелых металлов накапливается в верхних горизонтах почв, являющихся корнеобитаемым слоем для большинства видов растительности эфемероидной полусаванны. Наиболее фитоиндикативным показателем уровня загрязнения почв тяжелыми металлами являются фитоценотический состав растительного сообщества и проективное покрытие почв растительностью. Растительные сообщества различных зон загрязненности почв тяжелыми металлами неодинаковы как по количеству видов, так и по фитоценоческому составу групп, при этом в направлении роста токсического градиента растет доля эрозиофильных и рудеральных видов с преобладанием многолетних видов растений. Кроме того, в градиенте роста загрязнения наблюдается снижение доли мезофитных и увеличение ксерофитных экологических групп растений. Установлено, что скудный и стабильный видовой состав сообщества сосудистых растений импактной зоны загрязнения обоснован наличием у этих видов определенных механизмов устойчивости, обусловленных механическими, ростовыми барьерами и способностью растительного организма нейтрализовать излишнее количество ионов тяжелых металлов в виде нерастворимых в воде солевых отложений в межклеточном пространстве. Разработана технология фитоконсервации пылящих поверхностей токсичных отходов полиметаллического производства АО "Южполиметалл", обеспечивающая за два года применения проективное покрытие консервируемой поверхности на 85...100%.

Ключевые слова: фитоиндикация, фитоконсервация, токсичные отходы, тяжелые металлы, высшие сосудистые растения.

Введение. Одним из наиболее чувствительных компонентов экосистем являются высшие сосудистые растения, изменения которых под воздействием антропогенного фактора - интегральный показатель трансформации природных комплексов. При этом в качестве индикаторных признаков служит комплекс морфометрических и надорганизменных изменений фитоценоза. Наличие хорошо выраженных градиентов техногенного загрязнения позволяет наблюдать весь спектр реакций растительности от необратимых повреждений до различных адаптационных модификаций. Изучение изменений признаков растительности на организменном, популяционном и экосистемном уровнях позволяет установить степень техногенного воздействия и судить о пространственных размерах и временных стадиях развития экологической ситуации [1, 2]. Выявление толерантных к действию экотоксикантов видов растений имеет важное значение в биоремедиации техногенно деградированных территорий [3, 4].

Степень развития растительности, видовой и экобиоморфологический состав высших растений и их распределение в различных биотопах обуславливаются особенностями экологических условий и подчиняются определенным закономерностям [5]. Однако техногенное воздействие, как мощный прямодействующий фактор, оказывает однозначное влияние на направленность процесса формирования растительных сообществ [6-9]. Эти изменения зависят от количественных и качественных показателей техногенного фактора [10-13]. Устойчивое и длительное воздействие экотоксикантов на растительный организм вызывает различного рода изменения, проявляемые на клеточном, организменном и ценоотическом уровнях их организаций [14,15], которые, в конечном счете, ведут к трансформации исторически сложившегося фитоценоза [16,17]. В процессе деградации видового разнообразия фитоценоза из состава растительного сообщества в первую очередь выпадают чувствительные к действию токсикантов виды растений [18-20]. В дальнейшем в градиенте роста концентрации происходит формирование специфических сообществ, состоящих из доминирующих видов новой экологической ситуации [21-25]. При этом, в зависимости от природы и механизма действия техногенного фактора, такие растительные сообщества будут существенно различаться по

своей биоэкологической структуре организации. А в случаях очень высоких токсических нагрузок существующий фитоценоз может полностью погибнуть [26]. Снижение видового состава фитоценоза влечет за собой снижение и степени проективного покрытия почвы растительностью, которое ведет к опустыниванию такой территории [27]. Таким образом, методы фитоиндикации экологического состояния нарушенных экосистем основаны на специфических реакциях отдельных видов растений и их сообщества на действие техногенного фактора [28].

Металлы и их соединения образуют значительную группу токсикантов, которые при попадании в растительный организм вызывают нарушения многих процессов метаболизма. Как следствие этого, высокий токсический фон их ионов оказывает селективное действие на видовой состав фитоценоза [29]. Однако селективный эффект токсического действия тяжелых металлов в значительной степени зависит от почвенно-климатических условий местности. Так, исследованиями Меллинга Э.В. [30] установлено, что в условиях умеренно влажного климата средней полосы России повышенные концентрации ионов тяжелых металлов в почве способствуют увеличению в растительном сообществе доли однолетних и снижению многолетних видов растительности, что связано со значительными темпами фильтрации тяжелых металлов в более глубокие слои почвы. Кроме того, установлено, что в градиенте роста концентрации ионов тяжелых металлов в растительном сообществе доминируют эрозофильные и сегетальные группы растений. А в условиях аридного климата установлена обратная тенденция накопления высоких концентраций ионов тяжелых металлов в верхнем слое почвы, что стало причиной обеднения видового состава фитоценоза за счет выпадения из его состава однолетних видов растений, доминирующая группа сообщества была сформирована в основном ксерофитной экологической группой растительности [31].

Химическая природа токсичности металлов до конца не выяснена. В научной литературе указываются различные механизмы их действия. По мнению исследователей, токсичность металлов связана с атомным весом и такими свойствами металлов, как нормальный потенциал и электроотрицательность. Токсический и летальный эффект тяжелых металлов зависит от концентрации и характера их распределения по всему организму растений. При этом большое значение может иметь как быстрота, так и прочность образующихся в биологических средах комплексов металлов с белками, ферментами и субстратами клеточных оболочек. По мнению

авторов [31], токсичность хрома проявляется через блокаду активных центров ферментов. В таких случаях ферменты не могут управлять общими процессами метаболизма. Поэтому токсичность многих металлов выявляется преимущественно при длительном контакте с ними. В повышении биологической доступности тяжелых металлов немалая роль принадлежит и ризосферной микрофлоре. Почвенные микроорганизмы могут переводить нерастворимые формы солей тяжелых металлов в растворимые.

О механизме передвижения тяжелых металлов из корней в надземные части растений имеется мало информации. По мнению ряда авторов, в корнях соединения тяжелых металлов частично обезвреживаются и переводятся в более мобильную химическую форму, после чего накапливаются в других органах. Предполагается, что малорастворимые соли тяжелых металлов перемещаются по сосудистой системе в виде комплексных соединений.

Металлы распределяются по органам растений неравномерно. В одной и той же части растения концентрация химических элементов существенно изменяется в зависимости от фазы его развития и возраста. В наибольшей степени металлы накапливаются в листьях. Для отдельных видов растений характерны определенные диапазоны концентрации химических элементов, в том числе и тяжелых металлов. Величина среднего содержания одного и того же элемента в различных видах растений, произрастающих в одинаковых условиях, часто колеблется в 2...5 - кратном диапазоне [32].

Установлено [33,34], что различные таксономические группы растений обладают узкой специфичностью по чувствительности к определенным видам металлов. Соли таких тяжелых металлов, как кадмий, свинец, теллур и алюминий, оказывают пагубное действие на наследственный аппарат растительной клетки. Повышенное содержание вредных солей металлов способно механически повреждать хромосомы, а также вызывать мутации [35].

В целом действие техногенных факторов на растения вызывает определенные морфологические и генетические изменения, причиной которых являются токсические свойства различного рода веществ. В растительных сообществах загрязненных территорий происходит естественный отбор толерантных видов, которые определяются как растения-доминанты нарушенных экосистем. Установление коррелятивной взаимосвязи между действием факторов и морфометрическими изменениями или выжившими доминантными видами растений может служить основой фитоиндикационного метода оценки экологического состояния регионов.

Изучение вопросов методологии выявления видов – фитоиндикаторов – одно из наиболее перспективных направлений исследования данной проблемы. Подробное изучение фитоиндикационных свойств высших сосудистых растений позволит разработать методику применения региональных и теоретических списков фитоиндикаторов в форме шкал толерантности. На основе фитоиндикационных шкал можно разработать экспресс-методы оценки степени загрязненности среды и экологического состояния техногенной зоны в целом. На сегодняшний день существующие методы ремедиации нарушенных экосистем можно подразделить на три категории: физические, химические и биологические. Однако в настоящее время приоритет отдается биологическим методам, что обосновано их экономической выгодностью и экологической безопасностью.

Таким образом, можно отметить, что уровень техногенной нагрузки на экосистемы Южного Казахстана высок и продолжает перманентно расти. Проблема очистки загрязненных почв, несмотря на достаточно высокую степень изученности, имеет некоторые аспекты, основные вопросы которых мало изучены или имеют противоречивые данные. В известной научной литературе нет сведений о результатах использования жизнедеятельности токсикотолерантных видов растений в фитоконсервации токсичных отходов производства. Кроме того, большинство результатов исследований по биоиндикации и биоремедиации нарушенных экосистем посвящено решению экологических проблем умеренных климатических зон с повышенной влажностью и почвами, богатыми гумусом.

В этой связи основной целью исследования было изучение возможности фитоиндикации и фиторемедиации почв Южного Казахстана, загрязненных тяжелыми металлами.

Постановка задачи и обоснование методики. В качестве объекта исследования послужили почвы и флора зоны устойчивого влияния производственной деятельности и отходов производства Акционерного общества “Южполиметалл” (АО “ЮПМ”). Данное предприятие расположено на берегу реки Бадам, в юго-западной части г. Шымкент на юге Казахстана. Территория и санитарно-защитная зона предприятия плотно прилегают к жилым кварталам города. Отходы полиметаллического производства складываются в трех километрах от производственной зоны, на другом берегу реки. Общий объем отвалов, содержащий в своем составе ионы Pb^{2+} и Cd^{2+} , составляет 2,2 (в настоящее время - 1,8) млн тонн (рис. 1). Зонами наибольшего риска загрязнения являются территории

Абайского района и микрорайона “Казгурт” г. Шымкент, расположенные по направлению господствующих на местности юго-западного и северо-западного ветров.



Рис.1. Снимок производственной и санитарно-защитной зон АО “ЮПМ”:
1- производственная зона АО “ЮПМ”; 2- жилые кварталы города; 3- русло реки Бадам; 4- территория складирования отходов полиметаллического производства

Химический анализ почв на содержание ионов тяжелых металлов проводился на расстоянии 500, 1000, 1500 и 2000 метров от территории АО “ЮПМ” и 100, 500, 1000, 2000 и 5000 метров от террикона, во всех направлениях частей света. Динамика миграции тяжелых металлов по горизонтам профиля почв изучалась на основе результатов химических анализов проб почв, отобранных на глубинах 10, 20, 30 и 40 см. В качестве контроля были отобраны территории, расположенные в 8000 метрах от анализируемых участков.

Результаты исследования

Фитоиндикация степени загрязненности почв. Миграция ионов тяжелых металлов по профилю почв происходит очень медленно, вследствие чего в корнеобитаемом слое почв отмечается их высокое содержание. Известно, что избыточное количество ионов тяжелых металлов в почве обладает фитотоксическими свойствами. Виды растений, в свою очередь, также различаются по степени устойчивости к ним, что обусловлено индивидуальностью природы их

механизмов защиты. В связи с этим высокий токсический фон тяжелых металлов в почве служит тем селективным фактором, который в условиях длительного воздействия приводит к формированию специфических фитоценозов, состоящих только из устойчивых видов растений. Это происходит потому, что из состава растительного сообщества постепенно выпадают чувствительные и неустойчивые виды. Следовательно, видовой состав растительного сообщества адекватно отражает количественные показатели содержания тяжелых металлов в почве, что может служить индикатором степени загрязненности почв. При обследовании нативных территорий вокруг терриконов и прилегающих к санитарно-защитной зоне АО «ЮПМ» визуально была установлена связь между проективным покрытием растениями поверхности участков и расстоянием от источников загрязнения. При проведении исследований по разработке методов фитоиндикации и фиторекультивации было необходимо установить зависимость видового состава растительности от концентраций кислоторастворимых форм ионов тяжелых металлов в почве, а также выявить доминантные виды растений загрязненных зон. Для этого требовалось провести флористические исследования видового состава фитоценоза указанных зон и лабораторные исследования по определению концентрации ионов тяжелых металлов в почве на различных расстояниях от источников.

На основе результатов химических анализов почв составлена условная карта местности, где определены зоны с различной степенью загрязненности почв ионами свинца и кадмия. Исследованиями установлено, что наиболее загрязнены жилые массивы в радиусе 1500 метров в северо-восточном направлении от АО «ЮПМ». В установленных зонах концентрации ионов свинца и кадмия в почве находятся в прямой зависимости от расстояния от источника загрязнения и колеблются, соответственно, в пределах $135,4...2345,6 \pm 24,4$ мг/кг (или 4,2...73,5 ПДК) и $1,7...20,3 \pm 2,1$ мг/кг (или 3,4...40,6 ПДК). Эти результаты получены в результате анализа проб почв с нативным горизонтом, которые сохранились только в отдельных территориях жилых массивов. Горизонты почв большинства территории жилых дворов и административных зданий подвергнуты нарушению в результате строительных и озеленительных работ. Поэтому при рендомизированном отборе проб почв эти показатели могут варьировать значительно. По этой же причине проведение флористического анализа видового состава растительного сообщества затруднено, что связано с наличием многих заносных и культурных видов растений. В противоположность этому, район складирования отходов производства характеризуется отсутствием

антропогенного воздействия. В радиусе 1500 метров от террикона сохранилась территория с нативным горизонтом почв и естественным растительным покровом, которая в течение 70 лет подвергалась хроническому загрязнению ионами тяжелых металлов.

Результаты химического анализа показали, что на расстоянии 100 метров от террикона концентрации ионов свинца и кадмия в 10 см слое почвы составили соответственно $14496,5 \pm 567,3$ и $25,3 \pm 2,3$ мг/кг, что соответствует $453,3 \pm 34,7$ и $50,6 \pm 5,5$ ПДК. По мере удаления от террикона на расстоянии 2000 метров (территория микрорайона “Казгурт”) содержание металлов составляет соответственно $96,6 \pm 8,4$ и $3,3 \pm 0,2$ мг/кг (или $3,0 \pm 0,1$ и $6,0 \pm 0,5$ ПДК) (рис. 2,3). Исследования динамики миграции тяжелых металлов по профилю почв выявили, что $70,0 \pm 5,9\%$ от общего установленного объема кислоторастворимых форм свинца и кадмия сконцентрированы в 0...10 см горизонте почвы.

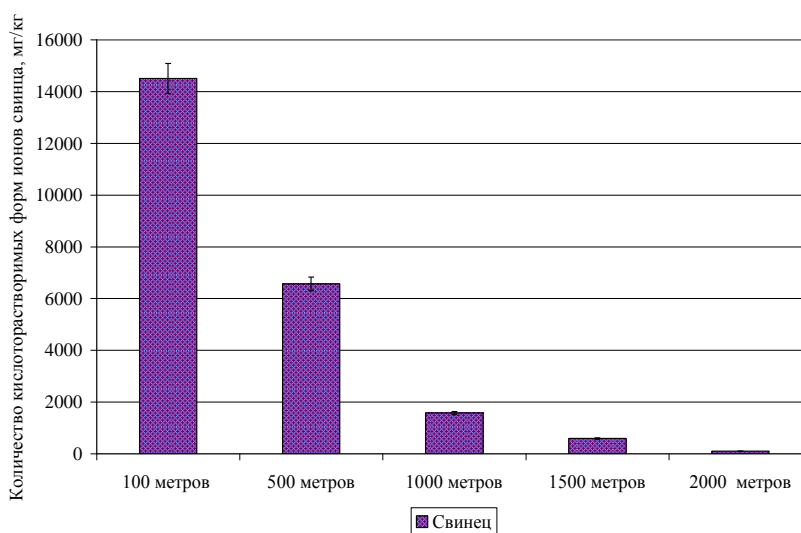


Рис. 2. Содержание кислоторастворимых форм ионов свинца в почве на различных расстояниях от террикона АО “ЮПМ”

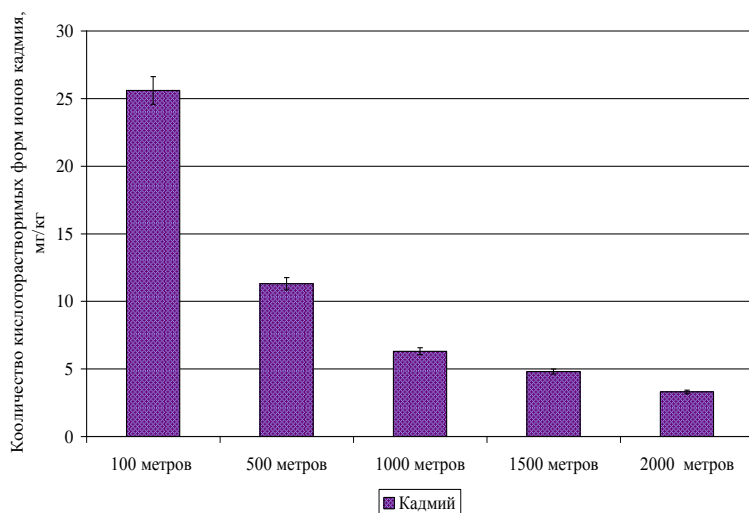


Рис. 3. Содержание кислоторастворимых форм ионов кадмия в почве на различных расстояниях от террикона АО "ЮПМ"

Концентрация тяжелых металлов в нижних 10...20 и 20...40 см горизонтах почвы, соответственно, составила $45,0 \pm 3,7\%$ и $20,0 \pm 2,1\%$ от установленного суммарного объема ионов тяжелых металлов. Содержание тяжелых металлов в почве в пределах значений ПДК установлено на глубине 50,0...60,0 см. Полученные результаты показывают, что в условиях аридного климата юга Казахстана наибольшая концентрация ионов тяжелых металлов накапливается в верхних до 40,0 см горизонтах почв, который является корнеобитаемым слоем для большинства видов растительности эфемероидной полусаванны.

Флористический анализ изучаемых территорий показал, что растительное сообщество контрольного участка (в 8000 метрах от источника загрязнения) представлено 103 видами высших растений, которые являются представителями 17 семейств. Доминирующее положение в сообществе занимают семейства мятликовые (22 вида, 32,9%), сложноцветные (14 видов, 16,5%) и бобовые (10 видов, 18,7%). Далее следуют выюнковые (7 видов, 6,2%), крестоцветные (5 видов, 5,1%), гречишные (4 вида, 4,2%) и пасленовые (3 вида, 3,1%). Остальные семейства представлены 1...3 видами однолетних и многолетних форм травянистых растений. Проективное покрытие поверхности почв составляет 96,7%. Практически все установленные виды растений были отмечены в той или иной степени на территории со степенью загрязненности почв ионами свинца и кадмия, содержащими соответственно, до 3,0 и 6,6 ПДК. Однако в этом

сообществе растений отмечено незначительное изменение соотношения видов растений и увеличение доли представителей мятликовых и бобовых. Кроме того, по сравнению с контрольным участком, снижена степень проективного покрытия почв растительностью на $15,3 \pm 1,2\%$. На участках с повышенными дозами металлов отмечено резкое снижение как проективного покрытия поверхности почв растительностью, так и видового состава сообщества (рис. 4).

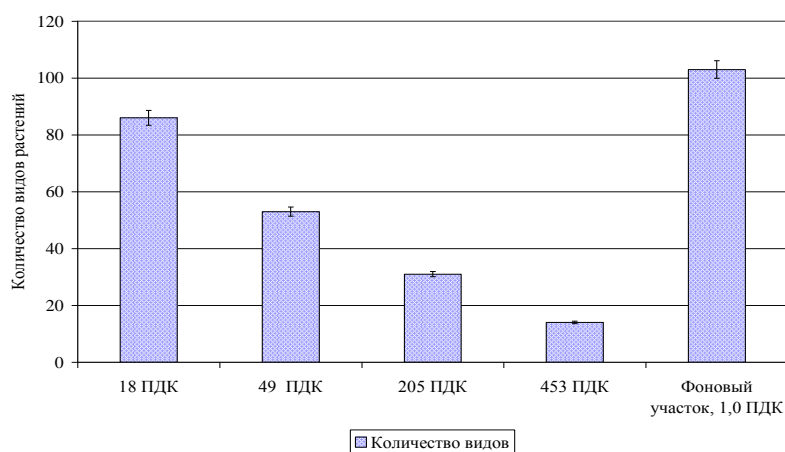


Рис. 4. Влияние роста токсического градиента ионов тяжелых металлов в почве на видовой состав растительных сообществ ЮКО

Установленные для различных зон загрязненности почв растительные сообщества неодинаковы как по количеству видов, так и по фитоценотическому составу групп. Если в составе сообществ контрольного участка и участка с наименьшей токсической нагрузкой (до 6,0 ПДК) преобладают луговые виды растений, то в направлении роста токсического градиента растет доля эрозиофильных и рудеральных видов. В этом же направлении по жизненным формам наблюдается закономерность преобладания многолетних видов растений. Анализ растительного сообщества по экологическим группам показал, что в градиенте роста загрязнения наблюдается снижение доли мезофитных и увеличение ксерофитных экологических групп растений.

Полученные нами данные согласуются с результатами аналогичных исследований, проведенных в условиях умеренного климата [36]. Авторами этих исследований установлено, что в условиях средней полосы России в составе фитоценоза загрязненных тяжелыми металлами территорий ведущая роль

принадлежит эрозиофильным, рудеральным и сегетальным группам растений. Расхождения в результатах по реакции однолетних видов растений на повышение токсичности почвы, по-видимому, объясняются климатическими различиями зон. В аридных условиях миграционные процессы по горизонтам почв протекают значительно медленнее, чем в условиях умеренного климата, что способствует большему накоплению токсикантов на верхнем слое почвы. Поэтому высокая токсичность этого слоя является причиной затруднения процессов роста и развития корневой системы однолетних видов и существенного снижения их семенного воспроизводства. Выпадение однолетних видов значительно упрощает ценотический состав растительного сообщества импактных зон загрязнения.

Ценотическая группа, составляющая основу растительного сообщества территории со средним и высоким уровнем загрязнения, сформирована 14 видами-доминантами, которые характеризуются многолетней, коротко- и длинностержневой, корнеотпрыскивающей корневой системой. Большая представленность стержнекорневых биоморф в сообществах импактной зоны определяется особенностями их корневой системы. Эта жизненная форма характеризуется хорошо развитым главным корнем, проникающим на большую глубину в почву, что способствует выведению зоны всасывания из токсичного горизонта почвы и выступает в качестве одного из механизмов защиты растений на организменном уровне. Ослабление процесса семенного воспроизводства однолетних видов и сильное упрощение ценотического состава сообщества существенно влияют на проективное покрытие почвы растительностью. При этом большая часть импактной зоны остается не покрытой растительностью, что способствует распространению пылевых частиц почвы с высоким содержанием тяжелых металлов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для фитоиндикации почв юга Казахстана, загрязненных ионами тяжелых металлов, наиболее информативными показателями являются фитоценотический состав растительного сообщества и проективное покрытие почв растительностью.

Реакция растений на загрязнение почвы тяжелыми металлами. Результаты флористических исследований показали, что растительные сообщества территорий, загрязненных тяжелыми металлами, существенно различаются по видовому разнообразию, при этом с ростом концентрации ионов тяжелых металлов в почве в растительном сообществе меняется соотношение фитоценотических групп растений. Однако для Южного Казахстана до настоящего времени не разработан метод оценки

загрязненности почв тяжелыми металлами, основанный на специфической реакции тест-организмов. Кроме того, не изучена устойчивость представителей местной флоры к токсическому фону тяжелых металлов, которые представляют практический интерес для разработки технологии фиторекультивации загрязненных тяжелыми металлами почв и фитоконсервации пылящих токсичных отходов полиметаллического производства. В связи с этим возникла необходимость проведения модельных опытов для изучения устойчивости полевых видов растений к различным концентрациям тяжелых металлов.

Устойчивость растений к токсическому действию тяжелых металлов связана со специфическими механизмами их защиты, проявляемыми на разных уровнях организации – организменном, клеточном и молекулярном. Анализ результатов предшествующих научных исследований показывает, что у большинства видов растений роль этих механизмов защиты и степень их эффективности не изучены. Нужно полагать, что в устойчивости у разных видов растений этим механизмам принадлежит неодинаковая роль. Результаты исследований, показывающие наличие миграции ионов тяжелых металлов от корней к последующим органам растений и закономерности снижения их концентрации по пути их передвижения к генеративным органам, свидетельствуют, что механический барьер, оказываемый покровной тканью, и избирательная проницаемость клеточных мембран корней не обеспечивают полную защиту растений от проникновения излишних концентраций ионов тяжелых металлов. Скорее всего, при наличии у видов растений различий по указанным видам механизма защиты важную роль играют биохимические процессы в клеточном соке, направленные на нейтрализацию токсического действия тяжелых металлов. При этом, безусловно, виды растений по наличию, интенсивности и эффективности этих процессов будут существенно различаться. Установленный для злаковых видов растений механизм защиты на молекулярном уровне объясняется эффективным действием фитосидерафор-специфических веществ, нейтрализующих и локализуящих избыточные ионы тяжелых металлов в вакуоли клетки растений [37]. Однако результаты проведенных флористических исследований показали, что доминантную группу видов сообщества составляют в основном двудольные виды растений. Следовательно, они обладают более эффективным видом механизма защиты или их комплексом, что обеспечивает их высокую устойчивость. В связи с этим были проведены исследования по изучению динамики миграции и

аккумуляции ионов свинца в различных частях растений видов-доминантов зоны вокруг террикона.

Результатами химических анализов биомассы ряда перспективных видов растений установлено, что наибольшее количество ионов свинца аккумулируется в биомассе таких видов, как додарция восточная, василек растопыренный и подорожник ланцетолистный. Остальные виды растений по этому показателю уступают вышеуказанным видам в 3,4...4,1 раза. Так, выявлено, что концентрации ионов свинца в биомассах корня, стеблях первого и второго порядков, листьях и плодах додарции восточной составляют $45,3 \pm 2,3$, $19,3 \pm 0,8$, $4,7 \pm 0,2$, $3,4 \pm 0,1$ и $0,3 \pm 0,01$ мг/кг соответственно. То есть, прослеживается известная закономерность аккумуляции тяжелых металлов в разных частях вегетативных органов растений, обусловленная механизмом защиты растений на организменном уровне. При этом общее содержание ионов свинца в биомассах вегетативных частей растений снижается в направлении от корня к генеративным органам. Наименьшее их содержание было установлено в биомассах листьев и плодов (рис. 5). Установленная закономерность подтвердилась результатами микроанализа, проведенного на электронно-растровом микроскопе JEOL-200.

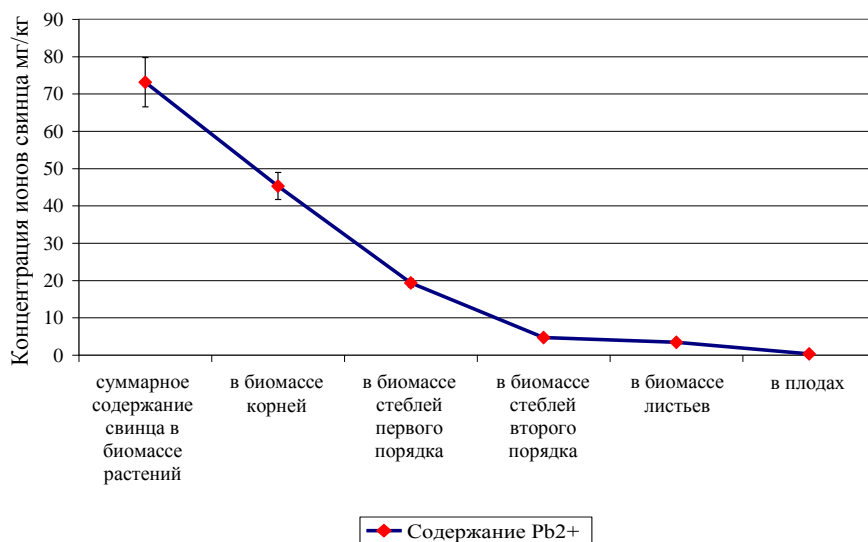
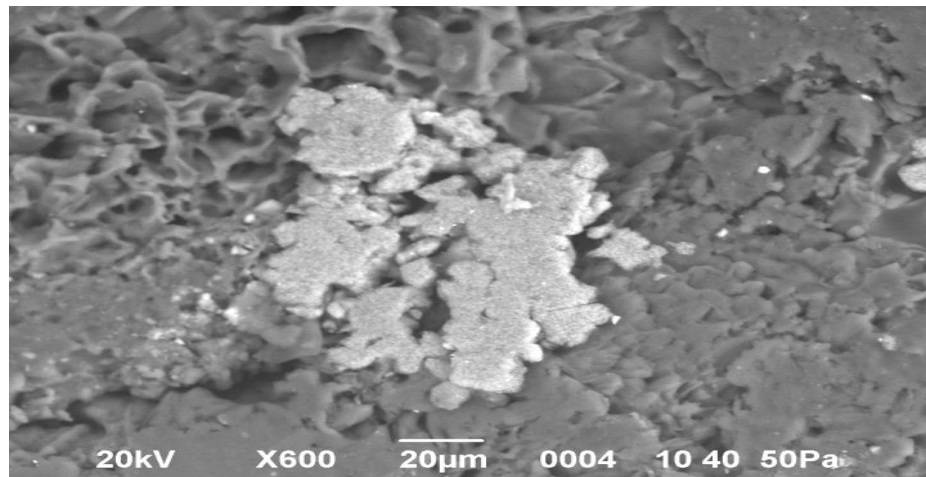
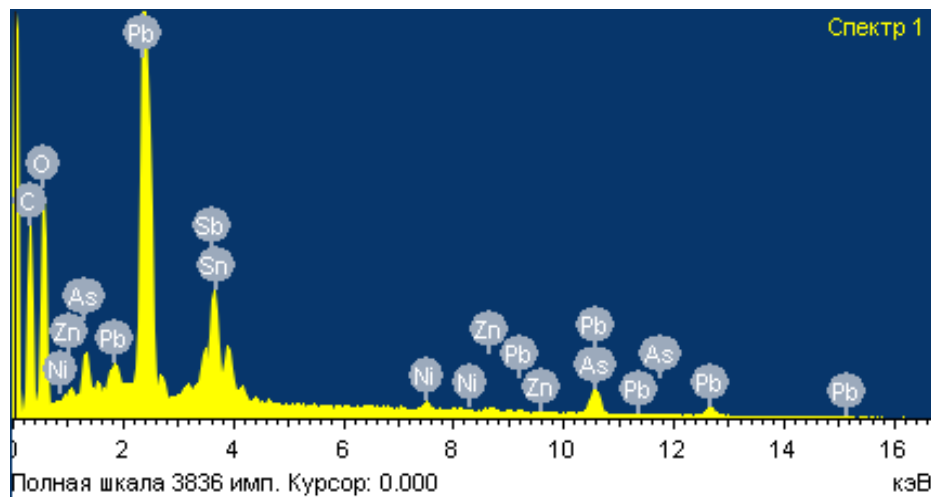


Рис.5. Уровень миграции ионов свинца по разным органам растений додарции восточной

Как видно из снимков электронного микроскопа, представленного на рис. 6, ионы свинца в биомассе додарции восточной, отобранной из зоны вокруг террикона АО “ЮПМ”, заключены в состав крупных конгломератов нерастворимых солей органических кислот.



а)



б)

Рис. 6. а - электронный снимок поперечного среза главного корня;
б - хроматографические пики элементного состава включений в основных тканях
корня растений додарции восточной

Размеры этих образований равны объему десятков клеток основной ткани и составляют 10...75 нм. Предположительно эти соли начали образовываться в межклеточном пространстве, и по мере увеличения их объема стенки соседних клеток постепенно раздвигались, что способствовало образованию локальных мест их скопления. При анализе тканей соответствующих вегетативных частей контрольных растений (8 км от г. Шымкент) образований таких размеров с содержанием ионов свинца не обнаружено. Анализ размеров солевых отложений, обнаруженных в разных частях анализируемых растений, показал, что наиболее крупные из них (25...75 нм) сконцентрированы в тканях корней. Размеры основного количества подобных образований, обнаруженных в стеблях первого и второго порядков, колеблются в пределах 10...30 нм. Однако удельный вес ионов свинца и других составляющих в них сильно варьирует, независимо от места расположения солевых отложений. Так, наибольший удельный вес ионов свинца установлен в солевых отложениях, обнаруженных в тканях главного корня и стебля второго порядка: 30,11 и 26,98% соответственно. Полученные данные исследований дают основание сделать предположение о том, что уменьшение суммарного объема накопленных в тканях ионов тяжелых металлов в направлении от корня к генеративным органам связано с действием различных механизмов защиты изученных видов растений.

Таким образом, полученные результаты объясняют причину установленной биоэкологической структуры фитоценоза, загрязненного тяжелыми металлами промышленных зон ЮКО. В условиях аридного климата в растительном сообществе импактных зон загрязнения ионами тяжелых металлов доминируют многолетние стержнекорневые виды растений, в экологической структуре которых преобладают ксерофитные формы. Устойчивость доминантных видов сосудистых растений обусловлена наличием комплекса механизмов устойчивости, среди которых способность главных корней растений к быстрому росту, обеспечивающая преодоление верхнего высокотоксичного слоя почвы за короткий срок времени. Кроме того, изученные виды растений обладают способностью нейтрализовать излишнее количество токсичных ионов в виде нерастворимых в воде солевых отложений. Наличие вышеуказанных механизмов защиты придает устойчивость растениям доминантных видов в ювенильных фазах роста и развития и обеспечивает их семенное воспроизводство в условиях высокого токсического фона, что, как следствие, приводит к достаточной стабильности

видовой состав фитоценоза территории с высоким содержанием ионов тяжелых металлов.

Фитоконсервация поверхности токсичных отходов полиметаллического производства. Способы фиторекультивации могут быть бесполезными до решения проблем консервации постоянно действующего источника загрязнения тяжелыми металлами близлежащих территорий – пылящих отвалов полиметаллических отходов АО “ЮПМ”. В связи с этим предлагается технология фитоконсервации с использованием растительного покрова из видов растений, устойчивых к высокому токсическому фону. В результате проведенных нами исследований было выявлено, что фитоценоз импактных зон загрязнения почв тяжелыми металлами формируют 14 доминантных видов флоры ЮКО. Эти виды растений способны образовать стабильный травостой и обеспечить семенное воспроизводство в условиях высокого токсического фона.

Исследованиями гранулометрического состава отходов производства АО “ЮПМ” установлено, что свинецсодержащие шлаки характеризуются как гравистый и рыхло песчаный субстрат с удельным весом частиц размером 0,5...3,0 мм (фракции - крупный песок, гравий и камни) до 66,2±5,0%.

Сильно выраженная макроструктура обеспечивает им высокую сыпучесть, пористость и водопроницаемость. Как следствие этого, показатели влагоемкости и влагоудерживающей способности субстрата очень низкие. Кроме того, полное отсутствие биогенных элементов и токсичные концентрации ионов тяжелых металлов являются основными препятствиями заселения их поверхности растительностью в естественных условиях. Лимитирующее действие этих факторов установлено и при искусственном посеве семян доминантных видов растений. С повышением высоты отвала резко снижаются как видовой состав, так и проективное покрытие поверхности растительностью (рис. 7).



Рис.7. Травостой верхнего яруса растительности (додарция восточная)

Поэтому, в целях повышения надежности и увеличения экономических показателей проводимых мероприятий, целесообразно сочетать преимущества установленных приемов в элементах базовой технологии, рассчитанной для фитоконсервации крупных отвалов. Таким образом, технология фитоконсервации пылящих поверхностей отходов полиметаллического производства предполагает проведение ряда этапов мероприятий (рис. 8).



Рис.8. Модульная схема процесса фитоконсервации токсичных отходов полиметаллического производства

Заключение. На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- для фитоиндикации почв юга Казахстана, загрязненных ионами тяжелых металлов, наиболее информативными показателями являются фитоценотический состав растительного сообщества и проективное покрытие почв растительностью;
- малочисленность и стабильность видового состава сообщества сосудистых растений импактной зоны загрязнения объясняются наличием у этих видов определенных механизмов устойчивости, обусловленных механическими, ростовыми барьерами и способностью растительного

организма нейтрализовать излишнее количество ионов тяжелых металлов в виде нерастворимых в воде солевых отложений в межклеточном пространстве;

- на основе использования жизнедеятельности токсикотолерантных видов сосудистых растений разработана технология фитоконсервации пылящих поверхностей токсичных отходов полиметаллического производства АО “Южполиметалл”, обеспечивающая за два года применения проективное покрытие консервируемой поверхности на 85...100%.

Литература

1. **Остроумов С.А.** Критерии экологической опасности антропогенных воздействий на биоту: поиски системы //ДАН. - 2000.-№6. - С. 844-846.
2. **Khondhodjaeva N.B., Ismillaeva K.B., Ruzimbayeva N.T.** Bioindication and its importance in the conducting of ecological monitoring //European science.–2018.–№4 (36). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bioindication-and-its-importance-in-the-conducting-of-ecological-monitoring> (дата обращения: 13.12.2022).
3. **Barbato R.A., Reynolds C.M.** Bioremediation of contaminated soils //Principles and Applications of Soil Microbiology (Third Edition).–2021.– P.607-631.
4. **Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.** Количественная гидроэкология и методы системной идентификации. – Тольятти, 2003. - 245 с.
5. **Васильев А.Г.** Многолетняя динамика биотических связей //Закономерности полувекковой динамики биоты девственной тайги Северного Предуралья: Сб.публ. - Сыктывкар, 2000. - С.155-167.
6. **Корольченко Д.А.** Современные биоремедиационные технологии // Пожаровзрывобезопасность.-2007.-№5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-bioremediatsionnye-tehnologii> (дата обращения: 13.12.2022).
7. **Бачурин Б.А., Авербух Л.М., Одинцова Т.А.** Особенности нефтезагрязнения природных геосистем Западной Сибири //Тезисы докл. Междунар. конф. “Горные науки на рубеже XXI века”.- Екатеринбург, 1998. - С. 400-408.
8. Экологическое состояние, использование природных ресурсов, охрана окружающей среды. -Тюмень, 2001.- 197 с.
9. **Дробот В.И., Пономарев С.В.** Экологическая оценка водоемов урбанизированных территорий по гидробиологическим показателям //Актуальные проблемы биологии, медицины и экологии. - 2004.- Т. 3, №1-3. - С. 374-385.
10. **Двинских С.А., Орлянская Н.А.** Экологические исследования в зоне действия комплекса выбросов предприятий химической промышленности //Тезисы докл. и сообщ. на 14-ом Менделеев. съезде по общ. и прикл. химии. – М., 1989.- Т.2. - С.493-498.

11. **Madhu P.M., Sadagopan R.S.** Effect of Heavy Metals on Growth and Development of Cultivated Plants with Reference to Cadmium, Chromium and Lead – A Review // *Journal of Stress Physiology & Biochemistry.*-2020.-№3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effect-of-heavy-metals-on-growth-and-development-of-cultivated-plants-with-reference-to-cadmium-chromium-and-lead-a-review> (дата обращения: 13.12.2022).
12. **Михайлуц А.П., Разумов А.С., Зинчук С.Ф., Минаков Е.С.** Эколого-гигиеническая оценка водных объектов г. Новокузнецка по результатам биотестирования // *ЭКО-бюллетень.* – 2002. - №11. - С.46-59.
13. **Barka N., Abdennouri M., El Makhfouk M., Qourzal S.** Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes // *J. Environ Chem Eng.* -2013.-1.-P.144-149.
14. **Аржанова В.С.** Значение и роль лишеноиндикационных исследований при эколого-геохимической оценке состояния окружающей среды // *География и природные ресурсы.* - 2000. - № 4. - С. 33-40.
15. Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review / **M.L. Sall, A.K. Diaw, D.D. Gningue-Sall, et al.** *Environ Sci Pollut Res.*-2020.-27.-P.3, 29927–29942, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09354-3>.
16. **Гальперин М.В.** Экологические основы природопользования: Учеб. пособие. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. - 256 с.
17. **Григорьевская А.Я.** Анализ флоры города // *Геоэкологические проблемы устойчивого развития городской среды.* - Воронеж, 1996. - С. 236-238.
18. Kinetics and equilibrium of cadmium removal from aqueous solutions by sorption onto synthesized hydroxyapatite/**N. Barka, K. Ouzaouit, S. Qourzal, A. Assabbane, M. Abdennouri, M. El Makhfouk, S. Qourzal, A. Assabbane, Y. Ait-Ichou, A. Nounah** // *Desalination Water Treat.*-2012.-43.-P. 8–16.
19. *Загрязнение воздуха и жизнь растений* / Под ред. **М. Трешоу.** - Л.: Гидрометеоиздат, 1988. - 534 с.
20. **Ковда В.А.** Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком// *Биогеохимические циклы в биосфере.* - М., 1976. - С. 19-85.
21. *Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды.* - М.: Мысль, 1983. - 255 с.
22. **Ларионова Н.Л.** Устойчивость к углеводородному загрязнению почвы и эффект фиторемедиации культурных и дикорастущих растений // *Современные проблемы загрязнения почв: Сб. науч. тр.* - М., 2004. - С. 319-321.
23. **Cheng S.** Effects of heavy metals on plants and resistance mechanisms // *Environ Sci Pollut Res.*-2003.-P. 256–264.
24. **Лозановская И.Н.** Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. - М.: Высш. шк., 1998. - 287 с.

25. Metals toxic effects in aquatic ecosystems: modulators of water quality, water quality /**S. Gheorghe, C. Stoica, G. Geanina Vasile, M. Nita-Lazar, E. Stanescu, IE Lucaciu.** Hlanganani Tutu.–2017.–Intech Open: <https://doi.org/10.5772/65744>. <https://www.intechopen.com/books/water-quality/metals-toxic-effects-in-aquatic-ecosystems-modulators-of-water-quality>
26. **Dimpe K.M., Ngila J.C., Mabuba N., Nomngongo P.N.** Evaluation of sample preparation methods for the detection of total metal content using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) in wastewater and sludge // *Phys Chem Earth.*– 2014.– 76.–P. 42–48.
27. **Dutta K., De S.** Aromatic conjugated polymers for removal of heavy metal ions from wastewater: a short review // *Environ Sci Water Res Technol.* –2017. –3(5). – P. 793–805.
28. **Gunatilake S.K.** Methods of removing heavy metals from industrial wastewater // *Multidiscip Eng Sci Stud.* – 2015. – 1(1). – P. 12–18.
29. A review on polyaniline-based materials applications in heavy metals removal and catalytic processes / **E. Eskandari, M. Kosari, M.H.D.A. Farahani, N.D. Khiavi, M. Saeedikhani, R. Katal, M. Zarinejad.** *Sep Purif Technol.* -2020.- 231. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115901>.
30. **Мелинг Э.В.** Влияние концентрации ионов тяжелых металлов на биоэкологическую структуру растительных сообществ техногенно нарушенных территорий //Тезисы докл. 15–й Междунар. науч.-практ. конф. “Экология и жизнь”. – Пенза, 2006. - С. 76-83.
31. Physiological changes induced by chromium stress in plants: an overview / **S. Hayat, G. Khalique, M. Irfan, A.S. Wani, B.N. Tripathi, A. Ahmad** // *Protoplasma.* – 2012. - 249(3). – P. 599–611.
32. **Андреенкова И.В., Круглов Н.Д.** Методические подходы к выявлению видов-биоиндикаторов и составлению теоретической биоиндикационной шкалы //Чтения памяти профессора В.В. Станчинского. –Смоленск, 2000. - С. 260-263.
33. **Берзиня А.Я.** Загрязнение металлами растений в придорожных зонах автомагистралей.- Рига, 1980. - С.28-38.
34. **Гринь А.В., Ли С.Н.** Поступление тяжелых металлов в растения в зависимости от их содержания в почвах //Тезисы Международ. науч.-практ. конф. “Ауезовские чтения-4” и Третьей науч. конф. вузов Южного региона. - Шымкент, 2004. - С.22-42.
35. **Godwill E.A., Ferdinand P.U., Nwalo F.N., Unachukwu M.N.** Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans // *Poisoning in the modern world - new tricks for an old dog.* – 2019. Intechopen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82511>.

36. **Жуйкова Т.В., Мелинг Э.В.** Биоэкологическая структура флоры растительных сообществ техногенно нарушенных территорий //Тезисы докл. 16 –й Междунар. науч.-практ. конференции “Экология и жизнь”. - Пенза, 2008.- С. 153-156.
37. **Маячкина Н.В., Чугунова М.В.** Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки //Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.- 2009. - №1. - С. 84-93.

Поступила в редакцию 25.08.2022.

Принята к опубликованию 12.01.2023.

**ՀԱՐԱՎԱՅԻՆ ՂԱԶԱԽՍՏԱՆԻ ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐՈՎ ԱՂՏՈՏՎԱԾ ՀՈՂԵՐԻ
ՖԻՏՈՒՆԴԻՎԱՑՈՒՄԸ և ՖԻՏՈՌԵՍԵԴԻԱՑՈՒՄԸ**

Ա.Ու. Իսահա, Ա.Ա. Եշիբակ

Ծանր մետաղներով հողերի աղտոտումը շարունակում է մնալ Հարավային Ղազախստանի առաջնահերթ բնապահպանական խնդիրներից մեկը: Պարզվել է, որ ջրի և քամու պատճառով էրոզիայի հետևանքով կապարի և կադմիումի իոնների պարունակությունը Շիմկենտի շրջանների հողերում, որոնք հարակից են կապարի-ցինկի խարամների պահեստավորման վայրին, սահմանային թույլատրելի կոնցենտրացիան (ՍԹԿ) գերազանցում է մինչև 453,3±34,7 անգամ: Հետազոտության հիմնական նպատակն է ուսումնասիրել Հարավային Ղազախստանի ծանր մետաղներով աղտոտված հողերի ֆիտոինդիկացման և ֆիտոռեմեդիացման հնարավորությունը: Պարզվել է, որ Ղազախստանի հարավի չորային կլիմայի պայմաններում ծանր մետաղների իոնների ամենամեծ քանակությունը կուտակվում է հողի վերին շերտերում, որոնք արմատային շերտ են էֆեմերոիդ կիսալուսնի բուսականության տեսակների մեծ մասի համար: Ծանր մետաղներով հողի աղտոտման մակարդակի առավել ֆիտոինդիկացիոն ցուցանիշներն են բուսական համայնքի բուսացենոտային կազմը և բուսականությամբ հողերի նախագծային ծածկությունը: Հողի աղտոտվածության մակարդակը որոշվում է հետևյալ կերպ. ծանր մետաղներով հողի աղտոտման տարբեր գոտիների բուսական համայնքները նույնը չեն ինչպես տեսակների քանակով, այնպես էլ խմբերի բուսացենոտային կազմով, մինչդեռ էրոզիահակ և ռոտերային տեսակների տեսակարար կշիռն աճում է թունավոր գրադիենտի աճի ուղղությամբ՝ բազմամյա բույսերի տեսակների գերակշռությամբ: Բացի այդ, աղտոտման աճի գրադիենտում նկատվում են մեզոֆիտային համամասնության նվազում և բույսերի քսերոֆիտային էկոլոգիական խմբերի ավելացում: Պարզվել է, որ ազդեցության աղտոտման գոտու անոթային բույսերի համայնքի սակավ և կայուն տեսակների կազմը հիմնավորված է այս տեսակների մեջ կայունության որոշակի մեխանիզմների առկայությամբ, որոնք պայմանավորված են մեխանիկական, աճի խոչընդոտներով և բուսական օրգանիզմի՝ միջբջջային տարածքում ջրի մեջ չլուծվող աղի հանքավայրերի տեսքով ծանր մետաղական իոնների չափազանց մեծ քանակությունը

չեզոքացնելու ունակությամբ: Այս մեխանիզմը թույլ է տալիս բույսերի օրգանիզմին չեզոքացնել ծանր մետաղական իոնների չափազանց մեծ քանակությունը: Մշակվել է «Յուժպոլիմետալ» ԲԲԸ-ի բազմամետաղային արտադրության թունավոր թափոնների փոշոտ մակերեսների ֆիտոռեմեդիացման տեխնոլոգիա, որն ապահովում է պահպանման մակերեսի 85-100% նախագծային ծածկույթ երկու տարվա օգտագործման ընթացքում:

Առանցքային բառեր. ֆիտոինդիկացում, ֆիտոռեմեդիացում, թունավոր թափոններ, ծանր մետաղներ, բարձր անոթային բույսեր:

PHYTOINDICATION AND PHYTOREMEDIATION OF THE POLLUTED WITH HEAVY METALS SOIL IN SOUTH KAZAKHSTAN

A.U. Isaeva, A.A. Eshibaev

Soil pollution with heavy metals remains one of the priority environmental problems of Southern Kazakhstan. It is found that due to the processes of water and wind erosion, the content of lead and cadmium ions in the soils of the Shymkent districts adjacent to the storage site of lead-zinc slags exceeds the MPC by up to 453.3 ± 34.7 times. The main purpose of the research was to study the possibility of phytoindication and phytoremediation of soils of Southern Kazakhstan contaminated with heavy metals. It was revealed that in the arid climate of southern Kazakhstan, the highest concentration of heavy metal ions accumulates in the upper horizons of soils, which are the root layer for most types of vegetation of the ephemeroïd semisavanna. The most phyto-indicative indicator of the level of soil contamination with heavy metals is the phytocenotic composition of the plant community and the projective covering of soils with vegetation. Plant communities of different zones of soil contamination with heavy metals are not the same both in the number of species and in the phytocenotic composition of groups, while the proportion of erosiophilic and ruderal species with a predominance of perennial plant species is growing in the direction of the toxic gradient growth. In addition, in the gradient of pollution growth, there is a decrease in the proportion of mesophytic and an increase in xerophytic ecological groups of plants. It has been established that the meager and stable species composition of the vascular plant community of the impact zone of pollution is justified by the presence of certain resistance mechanisms in these species due to mechanical, growth barriers and the ability of the plant organism to neutralize excessive amounts of heavy metal ions in the form of water-insoluble salt deposits in the intercellular space. The technology of phytoconservation of dusty surfaces of toxic waste of polymetallic production of JSC "Yuzhpolymetal" has been developed, which provides a projective coating of the preserved surface by 85-100% over two years of use.

Keywords: phytoindication, phytoconservation, toxic waste, heavy metals, higher vascular plants.