

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ ИВЫ В КАЧЕСТВЕ ФИТОРЕМЕДИАНТА НА ТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

Н.Г. Федорец, О.Н. Бахмет

Институт леса КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Одной из актуальных проблем является оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами (ТМ) антропогенных ландшафтов и разработка методов их очистки. В последние годы все более широкое применение (в основном в исследовательских целях) находят различные методы биоремедиации, включая фиторемедиацию, под которой понимают вынос ТМ путем их накопления в растениях, поскольку другие способы очистки по мнению ряда исследователей малоэффективны. Растения способны очищать почву на глубину распространения своих корней, поэтому деревья и кустарники, как правило, очищают почву на большую глубину, чем травянистые растения.

Основное достоинство фиторемедиации — ее низкая стоимость, а недостатком является значительная продолжительность процесса. В среднем фиторемедиация обходится в 2 — 4 раза дешевле, чем удаление и захоронение загрязненного горизонта. Несмотря на то, что термин фиторемедиация появился относительно давно, большого практического применения этот метод еще не нашел. В настоящее время не проработаны технологические аспекты: способы и сроки уборки растений-фиторемеди-

антов, продолжительность их выращивания, использование биомассы фиторемедиантов. Проведенные исследования показали, что фиторемедиация эффективна преимущественно при низкой и средней интенсивности загрязнения.

Основной показатель, по которому судят об эффективности фиторемедиации, — это общий вынос ТМ с единицы площади по отношению к валовому содержанию в почве. Эффективность фиторемедиации напрямую зависит от концентрации ТМ в отчуждаемой биомассе, а также от ее количества. Поскольку в большинстве случаев убирают надземную часть растений, об эффективности фиторемедиации можно судить по коэффициенту биологического поглощения (КБП) — отношению концентрации ТМ в растении к концентрации их в почве. Для очистки территории перспективны растения, устойчивые к ТМ, хорошо их накапливающие в побегах и обладающие высокой продуктивностью, чтобы обеспечить интенсивный вынос металлов со скошенной массой [1, 2].

В настоящее время растения по способности накапливать ТМ делят на три группы: аккумуляторы, накапливающие металлы главным образом в надземных органах как при

низкой, так и при высокой концентрации ТМ в почве; индикаторы, содержание металла в которых отражает его концентрацию в окружающей среде; эксклюдеры, в которых поддерживается низкое содержание металлов в побегах, несмотря на их высокую концентрацию в почве [3]. Из древесных и кустарниковых растений наибольшую извлекающую способность в отношении тяжелых металлов имеет ива, которую можно рекомендовать в качестве основного фиторемедианта. Установлено, что разные формы одного и того же вида могут значительно отличаться по накоплению ТМ [4].

Целью наших исследований являлась оценка возможности использования плантаций ивы Шверина (*Salix Schwerinii* E.L.Wolf) для очистки почв техногенных территорий, загрязненных комплексом тяжелых металлов.

Экспериментальная часть. В рамках российско-финляндского проекта "Развитие лесных плантаций для облесения хвостохранилищ и фиторемедиации в России" по программе научно-технического сотрудничества "ЕИСП ПГС Карелия (ENPI Karelia)" рассматривались перспективы выращивания ивы в качестве фиторемедианта на техногенных

территориях Северо-Запада России. Исследования проводились в Республике Карелия в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината (ОАО "Карельский окатыш"). Нарушение территории вокруг комбината и накопление в почвах токсикантов связано с функционированием карьеров по добыче железной руды, накоплением на поверхности почв прилегающих территорий отходов фабрики обогащения (пульпы), а также с воздействием поллютантов, входящих в состав пыли из карьеров и аэротехногенных выбросов комбината. В настоящее время на территории Костомукшского ГОКа находятся три действующих карьера по добыче железной руды: северный, западный и центральный. В районе этих карьеров образовались покрытые вскрышными породами территории, нуждающиеся в ремедиации. В качестве пульпохранилища комбинатом используется озеро "Костомукшское", большая часть которого в настоящее время заполнена пульпой (рис. 1).



Рис. 1. Пульпохранилище Костомукшского ГОКа

В задачу проведенных исследований входило создание плантации ивы с учетом климатических особенностей региона исследований и химического состава техногенных земель, образовавшихся в результате добычи железной руды. Выбор участка под плантацию ивы проводился на основе химического анализа субстратов в районе карьеров и пульпохранилища Костомукшского ГОКа. В качестве фиторемеди-

анта использовали иву Шверина (*Salix Schwerinii* E.L.Wolf), так как известно, что она является хорошим аккумулятором ТМ [5], кроме того, данный вид обладает устойчивостью к суровым условиям севера [6]. Плантация ивы была создана в 2012 г. посадкой черенками (рис. 2). Подросшие растения ивы (рис. 3) в 2013 г. были отобраны для их химического анализа по морфологическим частям дерева.



Рис. 2. Посадки ивы на пульпохранилище



Рис. 3. Ива Шверина через год после посадки

Таблица 1. Некоторые агрохимические показатели субстратов карьеров и пульпохранилища Костомукшского ГОКа

Объект	рН _{H₂O}	С	N	P
		%		
Северный карьер	3,8±0,05	54,9±1,02	2,6±0,37	2,6±1,24
Западный карьер	4,6±0,84	56,8±0,79	0,70±0,04	7,0±0,61
Пульпохранилище	7,6±0,08	0,27±0,02	0,01±0,001	0,70±0,04
Контроль*	4,2 – 4,6	40,1 – 43,7	1,1 – 2,0	0,10 – 0,14

* Подзол иллювиально-железистый песчаный в сосновых лесах Карелии [7].

Таблица 2. Валовое содержание металлов в субстратах в районе карьеров и пульпохранилища, мг/кг

Объект	K	Na	Ca	Mg	Fe
Северный карьер	238±69	97±37	1340±323	188±108	1699±515
Западный карьер	1209±306	951±61	18432±1409	2834±496	3386±1894
Пульпохранилище	6429±914	124±21	8576±523	3796±40	39505±2058
Контроль*	12102–14191	1524–19231	1009–11460	2156–4938	1243–17505

*Среднее содержание в минеральных подпочвенных горизонтах почв Карелии [7].

В субстратах карьеров и пульпохранилища определяли показатели рН водной вытяжки, содержание углерода, азота и фосфора по общепринятым методикам. Общее содержание металлов (Ca, Mg, Na, K, Fe), а также ряда микроэлементов (Cd, Pb, Cu, Co, Ni, Zn, Mn, Cr) устанавливали методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с предварительным автоклавным разложением в смеси концентрированных кислот. Показатели качества субстратов по содержанию питательных элементов и металлов, в том числе ТМ, сравнивали со средними региональными фоновыми показателями для Карелии [7]. Содержание металлов в растениях определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии после озоления пробы, уровень накопления ТМ в растениях сравнивали с имеющимися литературными данными [8, 9].

Химический анализ субстратов. Химические показатели субстратов на техногенных землях ГОКа сравнивали с показателями естественных, наиболее распространенных почв региона (подзолы иллювиально-железистые песчаные в сосновых лесах). Анализ субстратов показал, что на северном и западном карьерах показатель рН близок к таковому в естественных почвах (табл. 1). На центральном карьере и пульпохранилище

субстраты имеют слабощелочную реакцию среды.

Содержание углерода в субстратах на северном и западном карьерах относительно высокое, на этих территориях отмечено также значительное количество азота. Такие показатели соответствуют значениям, характерным для органогенных горизонтов почв. В субстратах пульпохранилища эти величины значительно ниже и близки к показателям количества углерода и азота в минеральных горизонтах подзолистых почв. Следует отметить высокое содержание фосфора во всех исследуемых субстратах, особенно на западном карьере. В связи с тем, что условия минерального питания растений на землях пульпохранилища в наибольшей степени отличались от естественных, характерных для региона, создание плантации фиторемигрантов представлялось целесообразным именно на этой территории.

Определение содержания металлов-макроэлементов показало, что в исследованных субстратах их количество в целом невелико по сравнению со средними (фоновыми) значениями в почвах Карелии. Лишь содержание железа в субстратах центрального карьера и пульпохранилища выше, чем в естественных почвах (табл. 2).

Концентрации тяжелых металлов в субстратах исследованных территорий сравнивали с

региональными фоновыми показателями содержания в минеральных горизонтах почв и существующими ПДК и ОДК металлов в почвах (ГН 2.1.7.2041-06. 2006, ГН 2.1.7.2042-06. 2006). Отметим, что установленный уровень загрязнения сформировался в условиях постоянного воздействия на почву технических вод, аэротехногенных поллютантов и других антропогенных факторов. По среднестатистическим показателям концентраций металлов этот уровень для каждого металла и на разных обследованных участках различен (табл. 3).

Содержание всех определенных тяжелых металлов в субстратах северного карьера оказалось ниже региональных фоновых показателей и значительно ниже ПДК. Субстраты западного карьера не содержали повышенных концентраций ТМ, лишь количество свинца составляло 0,5 ПДК, т.е. являлось потенциально опасным. В субстрате пульпохранилища отмечено накопление никеля по сравнению с фоновыми значениями, его содержание приближалось к 1 ПДК. Содержание определенных нами ТМ на данной территории превышало их накопление в субстратах территорий, прилегающих к карьерам, в связи с чем было принято решение о посадке плантации ивы на пульпохранилище.

Химический анализ растений. Исследование химического состава различных морфологических частей растений ивы, выращенных на пульпохранилище, показало, что органами, накапливающими наибольшие количества тяжелых металлов, являются корни и кора (табл. 4). Меньше всего тяжелых металлов отмечено в древесине ивы.

В практике лесного хозяйства широко распространен метод хвое-листовой диагностики, согласно которому определяют обеспеченность древесных растений элементами минерального питания по химическому составу хвои или листьев. В связи со сказанным выше сравни-

Таблица 3. Валовое содержание ТМ в субстратах карьеров и пульпохранилища, мг/кг

Объект	Cd	Pb	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Mn
Северный карьер	0,3±0,2	8,2±4,1	8,1±2,0	1,4±0,8	16,9±1,5	16,5±14,1	7,6±1,7	24±9
Западный карьер	0,5±0,2	15,8±6,6	6,1±2,7	2,2±1,2	25,8±4,2	11,2±16,4	10,5±7,5	158±44
Пульпохранилище	Нет данных	5,0±0,6	9,1±0,7	4,2±1,2	41,5±1,6	20,5±4,3	25,1±1,4	366±60
Региональный фон*	0,5	15,5	18,5	11,6	27,5	37,2	37,2	282
ПДК	3	32	100	50	50	300	100	1500
ОДК	0,5	32	33	нет	20	55	нет	1500

* Среднее содержание в минеральных подподстильных горизонтах почв Карелии [7].

Таблица 4. Содержание ТМ в морфологических частях ивы, выращенной на пульпохранилище Костомукшского ГОКа, мг/кг

Морфологические части растения	Cd	Pb	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Fe
Корни	0,42±0,13	4,3±0,5	19,5±12,0	37,8±12,0	2,7±1,5	16,3±12,7	9,3±9,0	1249±815	4084±652
Кора	0,78±0,12	1,5±1,3	2,9±0,3	50,9±0,6	0,2±0,1	1,3±0,4	1,7±0,5	190±10	597±114
Древесина	0,22±0,03	2,4±1,2	4,7±1,3	19,3±0,8	6,7±0,1	0,3±0,3	1,5±0,4	52±6	103±54
Листья	0,32±0,11	4,2±2,0	11,3±11,0	31,7±15,0	1,8±2,1	8,7±8,0	5,1±2,0	920±955	3621±623
Листья ивы на загрязненных почвах [8]	25	9,7	–	974	–	12	–	2012	283
Листья ивы (фон) [9]	0,68	0,21	7,7	125	1,76	8,97	0,2	310	Нет данных

вали химический состав листьев выращенных растений ивы на пульпохранилище с данными их химического состава, приведенными в литературных источниках. В результате установили, что листья ивы на экспериментальной плантации накапливали никель, марганец и железо в той же степени, что и на других техногенных землях, описанных в работах других авторов [9].

Концентрация остальных исследованных металлов в листьях ниже, чем у растений, выращенных на интенсивно загрязненных почвах. Это связано, с одной стороны, с тем, что растения в нашем опыте вегетировали короткий период (менее одного года), а с другой — степень загрязнения субстратов пульпохранилища ниже, чем приведено в литературе, где накопление ТМ в почвах составляло десятки единиц ПДК.

Сравнение химического состава листьев ивы экспериментальной плантации с приведенными в литературных источниках [9] данными для фоновых условно чистых территорий показало, что в листьях ивы пульпохранилища накапливались свинец, медь, кобальт, никель, хром и марганец.

Таким образом, проведенные исследования в условиях Северо-Запада России на техногенных землях, нарушенных

при добыче и переработке железной руды, показали, что при загрязнении субстратов ТМ может использоваться ива для их рекультивации.

Несмотря на короткий период выращивания, ива способна накапливать в своих органах значительное количество ТМ, для молодых деревьев от-

мечена наиболее значительная аккумуляция ТМ в корнях и коре.

Считаем, что ива Шверина (*Salix Schwerinii* E.L.Wolf) может служить как хорошим индикатором загрязнения техногенных земель, так и использоваться в качестве фиторемедианта.

Литература

1. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений. 2003. Т. 50. С. 764-780.
2. Willey N. Phytoremediation. Methods and Reviews. Ed. University of the West of England, Bristol, UK. Humana Press. 2007. 516 p.
3. Van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D., Pollard A.J., Schat H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. Plant and Soil. 2013. Т. 362. № 1-2. Р. 319-334.
4. Серегин КВ., Кожевникова А.Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция (обзор) // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 1. С. 3-26.
5. Жиряков А.С. Особенности аккумуляции тяжелых металлов представителями рода ива // Современные проблемы природопользования, охотведения и звероводства. 2007. № 1. С. 156.
6. Демидова Н.А., Дуркина Т.М. Результаты испытания местных и интродуцированных видов рода *Salix* на Европейском Севере России // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2012. Т. 21. № 21 (140). С. 79-83.
7. Федорев Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М., 2008. 47 с.
8. Пыленок П.И., Перегудов С.В., Яшин В.М., Meisner R. Исследование техногенеза пойменного агроландшафта // Материалы Международной научно-практической конференции "Мелиорация и водное хозяйство XXI века. Наука и образование". Горки, 2010. С. 281-283.
9. Кашулина Г.М., Салтан Н.В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината "Североникель". Апатиты, 2008. 235 с. ■