

Фиторекультивация техногенных ландшафтов с использованием растений рода *Salix* L.

© 2024. Е. Н. Теребова¹, к. б. н., доцент,
Н. В. Орешникова², к. б. н., доцент,
М. А. Павлова¹, аспирант,

¹Петрозаводский государственный университет,
185910, Россия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33,

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
e-mail: eterebova@gmail.com

Исследован фиторемедиационный потенциал видов рода *Salix* L. (Ивы) при рекультивации промышленной свалки комбината ОАО «Карельский окатыш», на территории которой в 2014 г. была создана плантация с использованием 7 видов рода *Salix*. Техногенный грунт ландшафта был загрязнён железом до 56 г/кг и беден основными макро- и микроэлементами. В течение 4 лет проводился анализ биоморфологических (рост, масса органов), физиологических показателей (содержание фотосинтетических пигментов, состав клеточной стенки листа) и накопления металлов (коэффициент биологического поглощения металлов (КБП)) растений ивы. Установлено, что максимальную приживаемость после посадки имели виды *S. schwerinii* (93%), *S. phylicifolia* (80%), *S. viminalis* (70%). Содержание фотосинтетических пигментов и специальный листовой индекс (SLA) листа *S. phylicifolia*, и *S. schwerinii* позволили оценить фотосинтетическую функцию растений, как оптимальную. Средний ряд накопления металлов (КБП) целым растением видов рода *Salix* следующий: Zn (31,92) > Cd (11,83) > Mn (5,10) > Pb (4,64) > Cu (4,40) > Cr (1,47) > Co (1,45) > Li (0,41) > Fe (0,17). За счёт высокой ионообменной способности клеточной стенки листа ив (1120–2050 мкмоль/г сух. кл. ст.) металлы могут связываться в организме растений. Ивы и в дальнейшем будут выполнять функцию облесения техногенной территории, создавать условия для развития продуктивного лесного фитоценоза.

Ключевые слова: фиторекультивация, *Salix*, металлы, железорудное производство, клеточная стенка, рост, фотосинтетические пигменты, коэффициент биологического поглощения.

Phytoremediation of technogenic landscapes using plants of the genus *Salix* L.

© 2024. E. N. Terebova¹ ORCID: 0000-0001-6556-9132²

N. V. Oreshnikova² ORCID: 0009-0006-0436-6538²

M. A. Pavlova¹ ORCID: 0000-0003-2326-4044²

¹Petrozavodsk State University,

33, Lenin St., Petrozavodsk, Russia, 185910,

²Moscow State University,

1, Leninskie Gory St., Moscow, Russia, 119991,

e-mail: eterebova@gmail.com

The phytoremediation potential of species of the genus *Salix* L. (Willow) was studied during the remediation of the industrial landfill of the OJSC “Karelsky Okatysh”. A plantation was created at this landfill in 2014. 7 species of the genus *Salix* were used for this purpose. The technogenic soil of the landscape was contaminated with iron up to 56 g/kg and was poor in basic macro- and microelements. Biomorphological (growth, organ weight) and physiological indicators (photosynthetic pigments content, leaf cell wall composition), as well as metal accumulation (biological absorption coefficient of metals (BAC)), were analyzed for willow plants during 4 years. We found that *S. schwerinii* (93%), *S. phylicifolia* (80%), and *S. viminalis* (70%) had the maximum survival rate after planting. The photosynthetic pigments content and the special leaf index (SLA) of *S. phylicifolia* and *S. schwerinii* leaves allowed us to evaluate the photosynthetic function of plants as optimal in conditions of soil iron contamination and a lack of macro-microelements. The average series of metal accumulation by a whole plant in species of the genus *Salix* is as follows: Zn (31.92) > Cd (11.83) > Mn (5.10) > Pb (4.64) > Cu (4.40) > Cr (1.47) > Co (1.45) > Li (0.41) > Fe (0.17). Due to the high ion exchange capacity of the

willow leaf tissues cell wall (1120–2050 $\mu\text{mol/g}$ of dry cell wall weight), metals can bind in the plant body. Phenolic and pectin substances dominate in the structure of the cell wall of willow leaves. Willows will continue to perform the function of afforestation of technogenic territory and create conditions for the development of a productive forest phytocenosis.

Keywords: phytoremediation, *Salix*, metals, iron ore production, cell wall, growth, photosynthetic pigments, biological absorption coefficient.

Одной из значимых проблем нашего времени является техногенное загрязнение окружающей среды, которое обусловлено различными явлениями и факторами, в частности антропогенной деятельностью. Следствием техногенного воздействия является накопление в почвах и грунтах значительного количества загрязняющих веществ (ЗВ), в частности таких токсичных поллютантов, как тяжёлые металлы (ТМ). В последние годы всё более широкое признание получает метод фиторемедиации, направленный на снижение токсичности и доступности ТМ посредством депонирования поллютантов растениями из среды их обитания [1, 2]. В связи с этим оценка уровня загрязнения нарушенных антропогенных территорий, а также выбор методов очистки и восстановления весьма актуальны.

Почвы выполняют свои экологические функции в отношении других природных образований: удерживая поллютанты, защищают подземные воды, связывая соединения в малоподвижные и недоступные растениям формы, предотвращают попадание токсичных веществ. Техногенные почвы формируются под влиянием промышленной деятельности человека. Часто они сочетаются с непочвенными образованиями – участками техногенных и природных грунтов. Однако, выполняя защитную роль, почвы постепенно накапливают ЗВ, становясь на определённом этапе непригодными для дальнейшего использования, нуждающимися в очищении. В этом случае на помощь приходит фиторекультивация – биологический этап рекультивации, направленный на восстановление загрязнённых почв посредством растительности. В ходе рекультивации конструируются почвоподобные тела (технозёмы), состоящие из одного или нескольких насыпных слоёв и поверхностного плодородного слоя. Слои технозёмов насыпные, следовательно, генетически не связаны, что отличает их от природных почв. Однако технозёмы обладают определёнными экологическими функциями: продукционными, сорбционными и водно-миграционными [3].

Для лесовосстановления и фитоэкстракции ЗВ из загрязнённых грунтов техногенных территорий активно используются растения

рода *Salix* L. (Ива) [4]. Это обусловлено биологическими и физиологическими особенностями ивы. Виды р. *Salix* отличаются значительным генотипическим полиморфизмом и большой амплитудой изменчивости особей [5]. Проводящие органы ивы характеризуются высокими показателями водного обмена [6], отмечена устойчивость к кавитации ксилемы [7], засухоустойчивость, газоустойчивость [8] и повышенный газообмен, позволяющий ивнякам поглощать до 11 т/га углекислого газа [9]. Также установлена высокая интенсивность фотосинтеза листа [10], связанная с повышенной устьичной проводимостью ассимиляционного аппарата [7]. Такая физиологическая активность ив позволяет им накапливать элементы в тканях и органах в высоких концентрациях и обеспечивать фитоэкстракцию поллютантов из среды. Однако в зависимости от уровня и типа загрязнения почвы, фазы онтогенеза, особенностей метаболизма и вида растений, распределение и накопление ТМ по растению ивы очень варьирует.

Цель работы – оценить фиторемедиационный потенциал (биоморфологические, физиологические показатели и накопление металлов) у видов рода *Salix* при рекультивации техногенных ландшафтов ОАО «Карельский окатыш».

Объекты и методы исследования

ОАО «Карельский окатыш» добывает и перерабатывает железную руду. SO_2 , CO_2 , N_xO_y , пылевые выбросы, содержащие металлы – основные поллютанты комбината. Содержание Fe, Cr, Mn, Pb, Zn, Cu, Sr в аэрогенной пыли установлено на уровне 1–0,1 мг/г. В 2020 г. выбросы ЗВ в г. Костомукше составили 81337 [11].

В июне 2014 г. на промышленной территории комбината ОАО «Карельский окатыш», (64°38'27.9" с. ш., 30°45'54.9" в. д.; 64°38'26.1" с. ш., 30°46'03.0" в. д.; 64°38'29.3" с. ш., 30°46'11.5" в. д.; 64°38'28.7" с. ш., 30°46'14.2" в. д.) Республики Карелия, СЗФО, являющейся бывшей промышленной свалкой (3 га), были высажены разные виды рода *Salix* L.: *Salix myrsinifolia* Salisb., *S. phlyicifolia* L.,



Рис. 1. Фиторемедиационная плантация 1 год эксперимента (фото Е.Н. Теребова)
Fig. 1. Phytoremediation plantation, the 1st year of the experiment (photo by E.N. Terebova)

S. viminalis L., *S. alba* L., *S. acutifolia* Willd. и проходящие испытание на фиторемедиационную способность в других странах гибрид *S. schwerinii* × *S. viminalis* (variety *Karin*) и вид *S. schwerinii* E.L. Wolf. В итоге была создана фиторемедиационная плантация ивы.

Род *Salix* относится к семейству *Salicaceae* (Ивовые). Род включает в себя порядка 400 видов деревьев, кустарников, кустарничков. Наиболее распространены ивы в северных областях Евразии и Северной Америки, в горах Китая. Образуют ивовые леса и кустарниковые заросли по берегам водоёмов, в ложбинах, оврагах и котловинах, на болотах, в альпийском и субальпийском поясах гор, в лесотундре и тундре. В лесной зоне встречаются в различных изменённых деятельностью человека местообитаниях. Ивы – гелиофиты, гигромезофиты. Высота растения достигает в среднем 15 м, редко до 40 м. Растения образуют обильную корневую поросль с образованием придаточных корней.

Растения ивы сажались черенком, размером 15–20 см, в техногенный субстрат, на расстоянии 0,5 м друг от друга и 3 м между рядами (рис. 1–3). Промышленная территория перед посадкой очищалась от мусора (стекло,

металл, резина, пластик) и засыпалась слоем торфа (до 5 см). Далее в течение месяца после посадки растения поливали два раза в неделю с помощью пожарных машин.

В сентябре 2014 г. (первый год эксперимента, после трёх месяцев выращивания посаженных растений) и в сентябре 2015 г. (второй год эксперимента, после года выращивания) отбирали растительные пробы и грунт на определение содержания металлов, проведение биометрических и физиологических исследований растений. В сентябре 2017 г. (четвёртый год эксперимента, после четырёх лет выращивания) оценивали содержание металлов в тканях и органах растений, грунтах. В работе представлены данные по трём видам ивы: аборигенным видам *S. phylicifolia* и *S. viminalis* (произрастают на территории Республики Карелия) и адвентивному виду *S. schwerinii* (не произрастает на территории Республики Карелия), который считается перспективным для фиторемедиации [10].

Методы исследования. Оценивали ростовые показатели растений, содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) листа спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Спектр



Рис. 2. Фиторемедиационная плантация, 4 год эксперимента (*S. shchwerinii*) (фото Е.Н. Теребова)
 Fig. 2. Phytoremediation plantation, the 4th year of the experiment (*S. shchwerinii*) (photo by E.N. Terebova)



Рис. 3. Фиторемедиационная плантация, 11 год эксперимента (2024)
 Fig. 3. Phytoremediation plantation, the 11th year of the experiment (2024)

2001) [12]. Состав клеточной стенки листа определяли методом потенциометрического титрования [14]. Металлы в растениях и грунтах определяли атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр AA-7000 (Shimadzu, Япония). Отбирали по 10 растений ивы каждого вида, делили их на корни, листья и побеги и определяли отдельно в органах содержание металлов. В работе представлены средние арифметические валовых значений содержания элементов в грунте и коэффициенты биологического поглощения металлов целым растением (листья+корни+побеги). Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов характеризует способность растений поглощать металлы из среды. Его рассчитывали как отношение содержания металла в растении к его содержанию в грунте. Грунт отбирали непосредственно в зоне

корней растений. Содержание азота, фосфора, углерода в грунтах определяли по методикам [13, 15]. Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Фишера (Fisher's LSD test) с учётом объёма сравниваемых совокупностей и порога доверительной вероятности 0,95 (программа Statgraphics 2.1 для Windows).

Результаты и обсуждение

Элементный состав грунта фиторемедиационной территории. Первичный анализ содержания элементов в грунте фиторемедиационной территории показал, что грунт беден азотом, углеродом, фосфором, а содержание металлов ниже контрольных значений, характерных для незагрязнённых лесных почв, за исключением железа (табл. 1), содержание

которого в грунте территории превышает контрольные значения и составляет 1,5 ПДК.

В ходе эксперимента были выявлены высокие коэффициенты вариации по содержанию металлов, что свидетельствует о гетерогенности почвенных условий фиторемедиационной плантации, то есть растения ивы были высажены в субстрат, загрязнённый железом и обеднённый макро- и микроэлементами.

Биоморфологические показатели растений. После года выращивания растений ивы на плантации оценили приживаемость растений в процентах. Установлено, что максимальная приживаемость у адвентивного вида

S. schwerinii (93%), минимальная – у гибрида *S. schwerinii* × *S. viminalis* (variety *Karin*) (40%). Аборигенные виды *S. myrsinifolia* (60%), *S. phyllicifolia* (80%), *S. viminalis* (70%) имели также высокие показатели приживаемости. У других видов *S. alba* и *S. acutifolia* приживаемость оценить не удалось. На основании этого в работе представлены биоморфологические данные по трём видам ивы: *S. phyllicifolia*, *S. viminalis* и *S. schwerinii*.

Анализ ростовых показателей видов ивы свидетельствует, что наибольшие биоморфологические характеристики наблюдаются у *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii*. Так, после года

Таблица 1 / Table 1

pH и содержание элементов в грунте фиторемедиационной территории, 1 год эксперимента
pH and element content in the soil of the phytoremediation area, the 1st year of the experi

| Показатель Index | pH _{вод.} pH _{water} | pH _{KCl} | C _{опр.} C _{орг.} | N | P | Li | Cd | Pb | Ni | Cu | Zn | Fe |
|-----------------------------|---|-------------------|--|---------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|----------|
| | % | | | мг/кг / mg/kg | | | | | | | | |
| Ср. значение Aver. value | 6,35 | 4,97 | 9,61 | 0,19 | 0,07 | 3,89 | 0,07 | 2,45 | 11,99 | 7,80 | 13,46 | 55230,37 |
| Min | –** | – | 7,69 | 0,10 | 0,05 | 2,66 | 0,03 | 0,79 | 8,31 | 6,39 | 8,75 | 16334,21 |
| Max | – | – | 13,12 | 0,37 | 0,11 | 4,31 | 0,10 | 8,16 | 20,71 | 9,54 | 24,17 | 70129,85 |
| CV, % | – | – | – | – | – | 0,57 | 0,06 | 16,05 | 21,30 | 1,63 | 17,54 | 60,00 |
| Фон* Background* | 4,90 | 4,00 | 45,70 | 2,17 | 0,10 | – | 0,5 | 16 | 28 | 19 | 37 | 17505 |
| ПДК* / MPC* | – | – | – | – | – | – | 3 | 32 | 50 | 100 | 300 | 38000 |

Примечание: *ПДК и фон – предельно допустимая и фоновая концентрация металлов в серых лесных почвах Карелии [16], ** – прочерк означает отсутствие данных.

Note: *MPC and background – maximum permissible and background metal content in grey forest soils of Karelia [16], ** – a dash means no data.

Таблица 2 / Table 2

Биометрические показатели разных видов рода *Salix*
Biometric indicators of different species of the genus *Salix*

| Длительность эксперимента Duration of the experiment | Длина корня, см Root length, cm | Длина побегов, см Shoot length, cm | Кол-во побегов, шт. Shoot number, pc | Кол-во лист/ побег, шт. Leaves/shoot number, pc | Масса сухая 10 листьев, г Dry weight of 10 leaves, g | Площадь листьев мм ² Leaves area, mm ² |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|---|
| <i>S. schwerinii</i> | | | | | | |
| 1 год / 1 st year | 13,4±6,4 | 25,5±11,3 | 4±1 | 23±8 | 1,30±0,41 | 866±323 |
| 2 год / 2 nd year | 20,2±13,4 ^{b*} | 68,0±33,0 ^a | 18±2 ^a | –** | 1,02±0,17 ^c | 1355±420 ^a |
| <i>S. phyllicifolia</i> | | | | | | |
| 1 год / 1 st year | 20,6±6,5 | 21,5±11,7 | 4±1 | 15±5 | 0,57±0,35 | 1134±470 |
| 2 год / 2 nd year | 39,7±4,4 ^a | 54,3±13,1 ^a | 15±3 ^a | – | 1,57±0,12 ^a | 1650±630 ^a |
| <i>S. viminalis</i> | | | | | | |
| 1 год / 1 st year | 15,8±6,5 | 20,1±10,7 | 5±2 | 38±7 | 0,35±0,01 | 498±120 |
| 2 год / 2 nd year | 21,7±7,6 ^b | 42,6±14,1 ^b | 10±2 ^b | – | 0,40±0,02 ^b | 585±196 ^b |

Примечание: * – для 2 года эксперимента, значения с разными индексами (a, b, c) достоверно отличаются относительно других значений в столбцах, согласно Fisher’s LSD test (p < 0,05); ** – прочерк означает отсутствие данных.

Note: * – the values with different indexes (a, b, c) are significantly different relative to other values in the 2nd year of the experiment, according to Fisher’s LSD test (p < 0.05); ** – a dash means no data.

Таблица 3 / Table 3

Содержание фотосинтетических пигментов и показатель SLA у разных видов рода *Salix* (средние значения за 1–2 года эксперимента) / Photosynthetic pigments content and SLA index in different species of the genus *Salix* (average values for the 1–2 years of the experiment)

| Вид растений Species | SLA, мм ² /мг mm ² /mg | Содержание пигментов, мг/г сухой массы Pigment content, mg/g of dry weight | | | | |
|-------------------------|---|---|---|--|----------------------------|------------------------|
| | | Общее Total | Хорофилл <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i> | Хлорофилл <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i> | Каротиноиды Carotenoids | <i>a/b</i> |
| <i>S. schwerinii</i> | 2,16±1,73 ^a | 1,89±0,21 ^b | 1,10±0,11 ^b | 0,61±0,09 ^a | 0,18±0,02 ^b | 1,80±0,07 ^b |
| <i>S. phylicifolia</i> | 2,20±3,41 ^a | 2,25±0,55 ^a | 1,22±0,25 ^a | 0,78±0,05 ^a | 0,25±0,08 ^a | 1,56±0,02 ^a |
| <i>S. viminalis</i> | 1,33±2,07 ^b | 1,68±0,15 ^b | 0,96±0,14 ^b | 0,58±0,18 ^a | 0,14±0,07 ^b | 1,70±0,04 ^b |

Примечание: * – значения с разными индексами (*a*, *b*, *c*) достоверно отличаются относительно других значений в столбцах, согласно Fisher's LSD test ($p < 0,05$).

Note: * – the values with different indexes (*a*, *b*, *c*) are significantly different relative to other values, according to Fisher's LSD test ($p < 0.05$).

Таблица 4 / Table 4

Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов (целым растением) у видов рода *Salix* / Biological absorption coefficient (BAC) of metals (whole plant) in species of the genus *Salix*

| Год эксперимента Year of the experiment | Li | Cd | Pb | Co | Ni | Cu | Cr | Zn | Mn | Fe |
|--|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|------|
| <i>S. schwerinii</i> | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,45 | 20,48 | 8,44 | 1,19 | 1,15 | 1,76 | 1,26 | 31,37 | 1,71 | 0,16 |
| 2 | 0,25 | 16,93 | 1,70 | 1,21 | 1,00 | 6,01 | 1,19 | 67,48 | 6,49 | 0,09 |
| 4 | – | 12,47 | 3,5 | 1,8 | 0,78 | 4,5 | 2,14 | 12,01 | 7,85 | 0,21 |
| <i>S. phylicifolia</i> | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,34 | 20,30 | 13,21 | 1,86 | 1,23 | 1,18 | 1,01 | 47,09 | 3,03 | 0,08 |
| 2 | 0,18 | 5,92 | 1,50 | 1,75 | 0,59 | 11,91 | 0,50 | 34,03 | 4,10 | 0,05 |
| 4 | – | 10,54 | 2,9 | 1,6 | 0,69 | 6,43 | 1,89 | 10,70 | 6,21 | 0,31 |
| <i>S. viminalis</i> | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,40 | 15,64 | 8,72 | 1,85 | 1,65 | 5,08 | 3,14 | 68,27 | 12,01 | 0,45 |
| 2 | 0,08 | 0,30 | 0,48 | 0,13 | 0,39 | 0,65 | 0,32 | 8,18 | 1,12 | 0,03 |
| 4 | – | 3,85 | 1,3 | 1,70 | 0,74 | 2,05 | 1,78 | 8,12 | 3,41 | 0,19 |
| Ср. значение Aver. val. | 0,41 | 11,83 | 4,64 | 1,45 | 0,91 | 4,40 | 1,47 | 31,92 | 5,10 | 0,17 |

выращивания наибольшей длина корня была у *S. phylicifolia* и составила 39,7±4,4 см. Также растения *S. phylicifolia* и *S. schwerinii* имели максимальное, по сравнению с *S. viminalis*, количество побегов – 15–18 шт./побег и площадь листьев 1355–1650 мм² (табл. 2).

Содержание фотосинтетических пигментов в листе растений. Фотосинтетическая функция растений является основой продуктивности. Оценить её позволяет анализ содержания фотосинтетических пигментов. Чем выше продуктивность растений, тем интенсивнее пластический обмен и синтез специальных метаболитов – фитохелатинов, компонентов клеточной стенки (углеводов, белков, фенолов), которые непосредственно депонируют металлы и участвуют в клеточных механизмах детоксикации поллютантов [17].

Полученные нами значения фотосинтетических пигментов листа ивы укладываются в известный диапазон пигментов, который может изменяться от 2,69±0,02 до 8,31±0,05 мг/г. При этом самые высокие значения были отмечены для листа *S. viminalis* в пойме р. Оби, по которым *S. viminalis* приближается к светолюбивым видам. Отношение хлорофилла *a* к *b* (*a/b*) может колебаться у разных видов в среднем от 1,39±0,03 до 3,63±0,05 [18].

Виды ивы фиторемедиационной плантации отличались содержанием фотосинтетических пигментов в листе. Максимальные уровни пигментов установлены у *S. phylicifolia*, меньше – у *S. schwerinii* и минимальные – у *S. viminalis*. Показатель SLA – специальный листовой индекс, который позволяет косвенно оценить способность к фотосинтезу у растений.

Рассчитывается как отношение площади листа к его массе в мм²/мг. Чем он больше, тем эффективнее фотосинтез растений. В ходе исследования установлено, что листья *S. phylicifolia* и *S. schwerinii* характеризуются наибольшими значениями SLA (табл. 3). Минимальное содержание пигментов в листьях *S. viminalis*, вероятно, обусловлено особенностями водного обмена вида. Данный вид наиболее устойчив к засухе [19], что может обратно коррелировать с синтезом фотосинтетических пигментов.

Накопление металлов растениями. Деponирование металлов, оценённое по КБП, позволило установить, что в первый год эксперимента все виды ивы активно поглощают литий, кадмий, свинец и никель (КБП больше, чем в другие годы эксперимента). Кроме этого, вид *S. viminalis* в первый год эксперимента активно накапливал цинк, марганец, медь, железо и хром (все металлы). *Salix schwerinii* и *S. phylicifolia* в целом характеризуются более интенсивным накоплением металлов, по сравнению с *S. viminalis*, в течение всего периода выращивания. В связи с тем, что грунт техногенного ландшафта обладает высокой гетерогенностью, поглощение элементов различными видами растений ивы и в разные годы варьирует. Средний ряд накопления металлов следующий: Zn (31,92) > Cd (11,83) > Mn (5,10) > Pb (4,64) > Cu (4,40) > Cr (1,47) > Co (1,45) > Li (0,41) > Fe (0,17); КБП показывает

во сколько раз содержание металла в растении больше (КБП>1) или меньше (КБП<1) содержания металла в среде обитания. Установлено, что литий плохо поглощается корнями растений. Это обусловлено его химическими особенностями: активный металл, с высоким восстановительным потенциалом, малым радиусом атома, представленный в течение выращивания в почве растворимыми соединениями. Также выявлено высокое содержание железа в грунте. Поэтому КБП этих металлов <1. Ивы накапливают элементы из среды обитания, деponируя их в своём организме (листья, ветви, ствол, корни). Существует проблема обратного возвращения части металлов в грунт с опадом ив. В связи с этим предлагается регулярно срезать ветви ивы и вывозить для дальнейшей утилизации: получения биогаза, сжигания, пиролиза [20].

Свойства клеточной стенки листа. Клеточная стенка клеток тканей листа и корня может деponировать металлы, связывая их своими функциональными группами (аминогруппы, карбоксильные, фенольные), составляющими структурные компоненты клеточной стенки – белки, углеводы, фенолы. Чем больше ионообменных групп в клеточной стенке, тем выше её ионообменная способность (S) [14]. Анализ состава клеточной стенки листа представлен в таблице 5. Отмечена высокая ионообменная способность (общее количество

Таблица 5 / Table 5
Содержание ионообменных групп в клеточной стенке листа растений рода *Salix*
Ion exchange groups content in the leaf cell wall of plants of the genus *Salix*

| Вид растений Plant species | Год эксперимента Year of the experiment | Количество групп, S ± 50, мкмоль/г сух.кл.ст. Number of the groups, S ± 50, μmol/g of dry cell wall weight | | | |
|-------------------------------|--|---|---|---|--|
| | | Аминогруппы Amino groups | Карбоксильные группы Carboxyl groups | Фенольные ОН-группы Phenolic OH-groups | Общее кол-во функциональных групп Total number of the functional groups |
| <i>S. schwerinii</i> | 1 | 160 | 560 | 400 ^a | 1120 ^a |
| | 2 | 120 | 450 | 1450 ^b | 2020 ^b |
| <i>v. Karin</i> | 1 | 200 | 820 ^a | 400 ^a | 1420 ^a |
| | 2 | 250 | 1300 ^b | 500 ^b | 2050 ^b |
| <i>S. phylicifolia</i> | 1 | 210 | 1086 ^a | 280 ^a | 1576 |
| | 2 | 220 | 580 ^b | 820 ^b | 1620 |
| <i>S. alba</i> | 1 | 200 | 320 ^a | 680 ^a | 1200 ^a |
| | 2 | 150 | 550 ^b | 900 ^b | 1600 ^b |
| <i>S. acutifolia</i> | 1 | 200 | 410 ^a | 800 ^a | 1410 ^a |
| | 2 | 170 | 600 ^b | 1000 ^b | 1770 ^b |

Примечание: * – значения с разными индексами (a, b, c) достоверно отличаются относительно других значений у видов ив по годам выращивания, согласно Fisher's LSD test (p<0,05).

Note: * – the values with different indexes (a, b, c) are significantly different relative to other willow species in different years of the experiment, according to Fisher's LSD test (p<0.05).

функциональных групп) клеточной стенки листа ив (1120–2050 мкмоль/г сух. кл. ст.), по сравнению с другими видами растений [21]. Также происходит увеличение ионообменной способности клеточной стенки листа у всех видов ив после года выращивания на фиторемедиационной плантации комбината.

Значимые отличия (Fisher's LSD test, $p < 0,05$) после года выращивания выявлены для общего количества групп в клеточной стенке у видов *S. schwerinii*, гибрида variety *Karin*, *S. alba*, *S. acutifolia*. При этом увеличение содержания групп в структуре клеточной стенки листа всех исследованных видов ивы в течение выращивания происходит в основном за счёт увеличения количества фенольных ОН-групп и карбоксильных групп (искл. у *S. phyllicifolia*). Карбоксильные группы могут входить в состав пектиновых веществ и гидроксикоричных кислот клеточной стенки. Именно катионообменные карбоксильные группы клеточной стенки в основном связывают металлы из среды обитания растений [22]. Фенольные-ОН-группы – маркеры фенольных соединений, в основном лигнина и суберина, компонентов вторичной клеточной стенки [14]. Известна адаптивная роль фенолов в метаболизме растений, особенно в защитных механизмах. Большинство фенольных соединений обладает мощными антиоксидантными свойствами, нейтрализует последствия окислительного стресса. Некоторые из них проявляют способность хелатировать ионы ТМ, фенолпропаноиды являются исходными молекулами для синтеза лигнина и суберина, укрепляя клеточные стенки растений [23].

Заключение

С целью фиторекультивации на промышленной территории ОАО «Карельский окатыш» была создана плантация видов растений рода *Salix* L. На фиторемедиационной территории грунт был загрязнён железом и беден основными макро- и микроэлементами растений. Виды *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii* оказались наиболее перспективными для использования в качестве фиторемедиантов. Они показали наибольший процент приживаемости и параметры роста по сравнению с другими видами ивы. Это связано с высокими показателями фотосинтетической функции *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii*. Растения ивы поглощали металлы из грунта, наиболее активно – цинк, кадмий, марганец, свинец, медь, хром, кобальт; менее активно – железо и литий. Связывание металлов растениями

Salix может происходить за счёт высокой ионообменной способности клеточной стенки листа. В условиях бедных (кроме железа) макро- и микроэлементами техногенных грунтов комбината листовая опад ивы, обогащённый металлами (фитоэкстракция поллютантов из среды обитания) и макроэлементами (собственная продукция растений) способствует формированию плодородной почвы. Можно сделать прогноз развития фиторемедиационной плантации: виды ивы и в дальнейшем будут выполнять функцию облесения техногенной территории, создавать условия для развития продуктивного лесного фитоценоза.

Авторы выражают благодарность О.В. Крупеня и В.В. Васильевой за организацию работы на территории ОАО «Карельский окатыш», В.И. Андросовой, Э.Л. Кайбейлену, Ю.Н. Ткаченко за совместную посадку растений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

References

1. Shen X., Dai M., Yang J., Sun L., Tan X., Peng C., Ali I., Naz I. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges // *Chemosphere*. 2022. V. 291. Pt. 3. Article No. 132979. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132979
2. Goncharova N.V. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants // *Ekologicheskiiy vestnik*. 2010. No. 4. P. 5–13 (in Russian).
3. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofieva T.V. Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation. Smolensk: Oikumena, 2003. 268 p. (in Russian).
4. Rodkin O.I., Tsybulko N.N. Prospects for using the phytoremediation method for deactivation of territories contaminated with radionuclides // *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023. No. 1. P. 42–50 (in Russian). doi:10.46646/2521-683X/2023-1-42-50
5. Nedoseko O.I., Viktorov V.P. Life forms of *Salix* L. genus types in Russia // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2018. V. 3 (2). P. 1–15 (in Russian). doi: 10.21685/2500-0578-2018-2-5
6. Kuzovkina Y.A., Volk T.A. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology // *Ecol. Eng.* 2009. V. 35. No. 8. P. 1178–1189. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.03.010
7. Wikberg J., Ögren E. Interrelationships between water use and growth traits in biomass-producing wil-

lows // Trees. 2004. V. 18. P. 70–76. doi: 10.1007/s00468-003-0282-y

8. Kulagin A. Yu., Ishbirdin A. R., Tagirova O. V. Adaptive variability of willow white (*Salix alba* L.) in the conditions of technogenic pollution of the environment (Southern Ural region) // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2020. V. 20. No. 1. P. 90–101 (in Russian). doi: 10.18500/1816-9775-2020-20-1-90-101

9. Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Structural and functional responses of woody plants to anthropogenic environmental changes: Damage, adaptations and strategies. Part 2. Effects on physiological functions // Biosfera. 2021. V. 13. No. 3. P. 101–119 (in Russian). doi: 10.24855/biosfera.v13i3.579

10. Kaybeyaynen E.L., Pelkonen P. Optimization of photosynthesis and transpiration in unseparated willow leaves on rapid regeneration plantations // Fiziologiya rasteniy. 2007. V. 54. No. 3. P. 350–355 (in Russian).

11. State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020 / Eds. A.N. Gromtsev, O.L. Kuznetsov, A.E. Kurilo, E.V. Vedentsova. Petrozavodsk, 2021. 277 p. (in Russian).

12. Mohsin M., Kuittinen S., Salam M.M.A., Peräniemi S., Laine S., Pulkkinen P., Kaipiainen E., Vepsäläinen J., Pappinen A. Chelate-assisted phytoextraction: Growth and ecophysiological responses by *Salix schwerinii* E.L Wolf grown in artificially polluted soils // J. Geochem. Explor. 2019. V. 205. Article No. 106335. doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106335

13. Terebova E.N., Oreshnikova N.V., Pavlova M.A., Starodubtseva A.A. Application of Scots pine bark and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in protected ground // Forestry Bulletin. 2024. V. 28. No. 2. P. 55–69 (in Russian). doi: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

14. Meychik N.R., Yermakov I.P., Khonarmand S.D., Nikolaeva Y.I. Ion-exchange properties of cell walls in chickpea cultivars with different sensitivities to salinity // Russ. J. Plant Physiol. 2010. V. 57. P. 620–630. doi: 10.1134/S1021443710050043

15. Dubrovina I.A. Changes in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in boreal soils of the Republic of Karelia when used in agriculture // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2018. No. 41. P. 27–41 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/41/2

16. Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V., Akhmetova G.V., Novikov S.G., Tkachenko Yu.N., Solodovnikov A.N. Heavy metals in soils of Karelia. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2015. 222 p. (in Russian).

17. Gąsecka M.G., Mleczek M., Drzewicka K., Magdziak Z., Rissmann I., Chadzinikolaou T., Golinski P. Physiological and morphological changes in *Salix viminalis* L. as a result of plant exposure to copper // J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. 2012. V. 47. No. 4. P. 548–557. doi: 10.1080/10934529.2012.650557

18. Ivanova N.A., Kostyuchenko R.N. Ecological and physiological mechanisms of adaptation of some species of willows in various habitat conditions on the territory of the Middle Ob region // Nizhneartovsk: Izdatelstvo Nizhneartovskogo gumanitarnogo universiteta, 2011. 163 p. (in Russian).

19. Kostyuchenko R.N. Ecological and physiological mechanisms of adaptation of some willow species in different habitat conditions on the territory of the Middle Ob region. Nizhneartovsk: Izdatelstvo Nizhneartovskogo gumanitarnogo universiteta, 2011. 163 p. (in Russian).

20. Sassner P., Mårtensson C.G., Galbe M., Zacchi G. Steam pretreatment of H₂SO₄-impregnated *Salix* for the production of bioethanol // Bioresour. Technol. 2008. V. 99. No. 1. P. 137–145. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.039

21. Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I. Cell wall functional activity and metal accumulation of halophytic plant species *Plantago maritima* and *Triglochin maritima* on the White Sea littoral zone (NW Russia) // Czech Polar Reports. 2020. V. 10. No. 2. P. 169–188. doi: 10.5817/CPR2020-2-14

22. Krzesłowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy // Acta Physiol. Plant. 2011. V. 33. P. 35–51. doi: 10.1007/s11738-010-0581-z

23. Kulbat K. The role of phenolic compounds in plant resistance // Biotechnol. Food Sci. 2016. V. 80. No. 2. P. 97–108.