

УДК 581.1+581.5

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *SALIX SCHWERINII* E. WOLF ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ТЕХНОГЕННО-ЗАГРЯЗНЁННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ОАО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

<sup>1</sup>Марковская Е.Ф., <sup>2</sup>Федоретц Н.Г., <sup>1</sup>Теребова Е.Н., <sup>2</sup>Бахмет О.Н., <sup>1</sup>Андросова В.И.,  
<sup>2</sup>Ткаченко Ю.Н., <sup>2</sup>Галибина Н.А., <sup>3</sup>Кайбияйнен Э.Л.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ)», Петрозаводск,  
e-mail: volev10@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБУН Институт леса Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск;

<sup>3</sup>Университет Восточной Финляндии, Йоэнсуу, e-mail: erik.kaipainen@uef.fi

Работа выполнена на техногенных территориях ОАО «Карельский окатыш» (Россия, Республика Карелия, г. Костомукша). Наиболее загрязненными являются субстраты центрального карьера и пульпохранилища, но их агрохимические свойства предположительно могут обеспечить растения-фиторемедианты необходимыми питательными элементами. В качестве ремедианта были использованы черенки ивы Шверина – *Salix schwerinii* E. Wolf (Финляндия), которая выращивалась на наиболее загрязненной территории – пульпохранилище (превышение ПДК по никелю, хрому, меди и низкое содержание азота). Пробы растений ивы в конце сезона разделили на две группы: с высокой продукцией биомассы (ВПБ) и с низкой продукцией биомассы (НПБ) и в каждой группе взяли пробы органов (корни, листья) и ткани (кора). Показано, что тяжелые металлы в субстрате пульпохранилища находятся в доступном для экстракции виде растениями ивы. Выделенные группы различались по месту локализации ТМ: у растений ВПБ они накапливались в корнях, а у НПБ – в листьях. По коэффициенту биологического поглощения (КБП) тяжелые металлы в растении составили следующий ряд: Zn>Mn>Cd>Cu>Pb>Co>Ni=Cr>Fe. Климатические и техногенные условия территории ОАО «Карельский окатыш» соответствуют технологии использования ивы Шверина в качестве фиторемедианта.

**Ключевые слова:** фиторемедиация, тяжелые металлы, фотосинтетические пигменты, морфометрические параметры, ивы, ОАО «Карельский окатыш»

## USING OF *SALIX SCHWERINII* E.WOLF FOR PHYTOREMEDIATION OF CONTAMINATED INDUSTRIAL TERRITORIES OF ОАО «KARELSKY OKATYSH»

<sup>1</sup>Markovskaya E.F., <sup>2</sup>Fedoretz N.G., <sup>1</sup>Terebova E.N., <sup>2</sup>Bachmet O.N., <sup>1</sup>Androsova V.I.,  
<sup>2</sup>Tkachenko J.N., <sup>2</sup>Galibina N.A., <sup>3</sup>Kaipianen E.

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University (PetrSU), Petrozavodsk, e-mail: volev10@mail.ru;

<sup>2</sup>Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk;

<sup>3</sup>University of Eastern Finland, Joensuu, e-mail: erik.kaipainen@uef.fi

The study was carried out on industrial territories of ОАО «Karelsky Okatysh» (Russia, Republic of Karelia, Kostomuksha). The most contaminated substrates were in central quarries and tailing dump, but it was expected that their agrochemical properties can provide phytoremediation plants by nutrients elements. As phytoremediation plants the cuttings of *Salix schwerinii* E. Wolf (Finland) were used. Plants were planted on the most contaminated territories of tailing dump (exceeding the maximum permissible concentrations of Ni, Cr, Cu and low N-content). Based on results of measurements sampled plants were divided into two groups: 1. – with high production of biomass (HBP) and 2. – with low production of biomass (LBP). The groups had differences in the places of heavy metals localization: HBP plants accumulated them in the roots, and LBP plants – in the leaves. According to the value of biological absorption coefficient there is the following row of heavy metals accumulation in the whole plant Zn>Mn>Cd>Cu>Pb>Co>Ni=Cr>Fe. The climatic conditions and pollution of the territory of «Karelsky Okatysh» appropriate for the technology of using of species *Salix schwerinii* as phytoremediation plants.

**Keywords:** phytoremediation, heavy metals, photosynthetic pigments, biometric parameters, willow, ОАО «Karelsky Okatysh»

Одной из актуальных проблем восстановления антропогенных ландшафтов является оценка уровня их загрязнения тяжелыми металлами (ТМ) и выбор методов санации. В последние годы все более широкое признание получает метод фиторемедиации, который обеспечивает фитозэкстракцию – вынос ТМ посредством их накопления в растительном организме. Этот способ имеет ряд преимуществ перед другими методами восстановления загрязненных территорий [5; 9]. Основное достоинство фиторемедиации – ее низкая

стоимость, а недостаток – длительность процесса, что начинает рассматриваться как преимущество, связанное с дальнейшим использованием взрослых растений в качестве биотоплива [7]. Термин «фиторемедиация» появился относительно давно [3], но использование предлагаемых разработок [8; 9] ограничивается локальными особенностями техногенных территорий и, в каждом частном случае, включает необходимость модификации уже известных методик. Это связано с различными климатическими условиями, расположением техногенных

территорий, типом, уровнем и характером загрязнения, ландшафтными особенностями и технологиями разработки и получения конечного продукта каждого горно-обогатительного комбината (ГОКа). В задачу исследования входило изучение возможности использования фиторемедианта – ивы Шверина (*Salix schwerinii* E.Wolf) для целей фиторемедиации на техногенных территориях ОАО «Карельский окатыш».

### Материалы и методы исследования

Район исследования. Работа выполнена на территории ОАО «Карельский окатыш» (Россия, Республика Карелия, г. Костомукша). Основными компонентами выбросов этого горно-обогатительного комбината являются диоксид серы (среднегодовая концентрация 0,03 мг/м<sup>3</sup>), пылевые выбросы, содержащие тяжёлые металлы, оксид углерода и окислы азота. В аэрогенной пыли определено содержание 18 элементов. По концентрации в пыли микроэлементы разделены на две группы: с содержанием 1-0,1 мг/г (Mn, Cr, Pb, Zn, Cu, Sr) и содержанием <0,1 мг/г (Zr, As, Br, Mo, Se). В 2012 году выбросы загрязняющих веществ ОАО «Карельский окатыш» составили: твердые вещества – 5,667 тыс. т., диоксид серы – 40,934 тыс. т., оксид углерода и оксид азота – 1,687 и 1,872 тыс. т. соответственно (Государственный доклад..., 2012). Больше всего в выбросах присутствует SO<sub>2</sub>.

Объектами исследования были растения ивы Шверина – *Salix schwerinii* E.Wolf. и загрязненные песчано-гравийные субстраты на территории ОАО «Карельский окатыш».

Заранее заготовленные черенки ивы Шверина (Финляндия) были посажены в мае 2012 года на песчаный субстрат вблизи пульпохранилища, что обеспечивало естественное увлажнение субстрата отработанными водами ОАО «Карельский окатыш». Продолжительность опыта 1 год. Сбор растительных образцов производили в августе 2013 года.

Методы исследования. Для сравнительного исследования растений были использованы морфометрические измерения, включающие определение площади и массы листьев. Рассчитана удельная площадь листовой поверхности (SLA – specific leaf area) как отношение площади поверхности листа к его сухой массе (мм<sup>2</sup>/мг).

Определение содержания пигментов проводилось спектрофотометрическим методом («UNICO 2800») с приготовлением спиртовых вытяжек. Анализ пигментов осуществлялся при максимумах поглощения – 665 и 649 нм для хлорофиллов (Chl) а и b, соответственно, и при максимуме поглощения 470 нм – для каротиноидов (Car). Концентрации хлорофиллов а, b и каротиноидов рассчитывали по формулам представленным в методике Винтерманса и Де Мотса (I.F. Wintermans, De Mots, 1965).

Коэффициент биологического поглощения (КБП) металла целым растением определяли как отношение содержания металла в растении (сумма содержания металла в корнях, листьях, коре и древесине за вычетом исходного содержания металла в посаженном черенке) к содержанию металла в почве.

Для анализа загрязнения территории были взяты субстраты из разных точек техногенной территории: северного, западного и центрального карьеров

и пульпохранилища. Определены некоторые показатели плодородия, pH солевой вытяжки из субстратов, валовое содержание углерода, азота, фосфора, калия, кальция, магния по общепринятым методикам (Аринушкина, 1975). Содержание металлов в почве и растительных тканях определяли атомно-абсорбционным методом (атомно-абсорбционный спектрофотометр AA-7000 с пламенным атомизатором, Shimadzu 7000, Япония). Пробы предварительно разлагали в смеси концентрированных кислот (HNO<sub>3</sub>:HCl, в соотношении 3:1) в системе микроволнового разложения (speed wave four, Berghof, Германия). Все анализы по содержанию ТМ были выполнены на оборудовании ЦКП «Аналитическая лаборатория» Института леса КарНЦ РАН.

### Результаты исследования и их обсуждение

Химические анализы грунтов на содержание элементов питания и тяжелых металлов представлены в таблицах.

Анализ субстратов. На основании результатов анализа проб субстратов на объектах исследований было установлено (табл. 1): показатель pH на северном и западном карьерах близок к показателям pH естественных почв. На центральном карьере и пульпохранилище pH имеет высокие значения, что соответствует слабощелочной реакции среды. Содержание углерода в субстратах на северном и западном карьерах довольно высокое и соответствует значениям, характерным для лесных подстилок. В субстратах центрального карьера и пульпохранилища содержание углерода низкое, но оно близко к показателям количества углерода в минеральных горизонтах подзолистых почв.

Субстраты северного и западного карьеров содержат значительно количество азота, в то время как на центральном карьере и пульпохранилище исследованные субстраты крайне бедны этим элементом. Следует отметить высокое содержание фосфора во всех исследуемых субстратах, особенно на западном карьере. Таким образом, можно заключить, что по агрохимическим показателям субстраты северного и западного карьеров вполне пригодны для выращивания растений фиторемедиантов. На центральном карьере и на пульпохранилище условия минерального питания растений значительно хуже.

По содержанию металлов-макроэлементов выявили следующее: почти во всех проанализированных субстратах количество металлов ниже, чем в среднем в почвах Карелии. Лишь в субстратах центрального карьера и на пульпохранилище содержание железа выше, чем в естественных почвах (табл. 2). Концентрации тяжелых металлов сравнивали с региональными фоновыми показателями содержания в минеральных горизонтах почв и существующими ПДК для металлов в почвах [2].

**Таблица 1**

Статистические характеристики показателей pH, содержания углерода и элементов питания растений в субстратах в районе карьеров и пульпохранилища в 2013 году

Показатель	Пробная площадь	Среднее	Станд. откл.	Макс	Мин	V, %	Контроль *
pH водн.	Северный карьер	3,80	0,049	3,84	3,73	1,29	4,9
	Западный карьер	4,60	0,844	5,50	3,73	18,45	-
	Центральный карьер	7,30	0,049	7,32	7,18	0,68	-
	Пульпохранилище	7,60	0,079	7,68	7,53	1,05	-
C, %	Северный карьер	54,9	1,023	56,21	53,53	1,86	45,7
	Западный карьер	56,8	0,788	57,76	56,01	1,39	-
	Центральный кар.	0,89	0,038	0,92	0,85	4,33	-
	Пульпохранилище	0,27	0,023	0,28	0,24	8,66	-
N, %	Северный карьер	2,64	0,371	2,98	2,15	14,05	2,17
	Западный карьер	0,70	0,039	0,76	0,64	5,65	-
	Центральный кар.	0,03	0,008	0,03	0,01	30,62	-
	Пульпохранилище	0,01	0	0,01	0,01	0	-
P, %	Северный карьер	2,63	1,240	4,61	1,24	52,25	0,10
	Западный карьер	7,04	0,606	7,95	6,23	8,52	-
	Центральный кар.	0,98	0,106	1,11	0,86	10,89	-
	Пульпохранилище	0,70	0,040	0,75	0,68	5,75	-

\* Местный контроль, лесная почва, подзол иллювиально-железистый.

**Таблица 2**

Содержание металлов в субстратах в карьерах и пульпохранилище в 2013 году, мг/кг

Показатель	Пробная площадь	Среднее	Станд. откл.	Макс	Мин	V, %	Контроль*
K	Северный карьер	238	69,140	334,80	155,38	29,02	14191
	Западный карьер	1209	305,769	1785,93	942,69	25,28	
	Центральный карьер	9345	556,429	9927,71	8363,44	5,95	
	Пульпохранилище	6429	913,897	7280,32	5463,23	14,21	
Na	Северный карьер	97	36,790	144,23	42,29	37,83	19231
	Западный карьер	951	60,600	1041,13	881,40	6,371	
	Центральный кар.	331	15,119	344,94	303,38	4,56	
	Пульпохранилище	124	20,691	145,85	105,03	16,75	
Ca	Северный карьер	1340	323,410	1751,64	1019,84	24,13	11460
	Западный карьер	18432	1409,405	20420,3	16498,93	7,646	
	Центральный кар.	6203	725,426	7657,33	5666,67	11,69	
	Пульпохранилище	8576	522,701	9162,08	8157,45	6,09	
Mg	Северный карьер	188	108,057	368,79	82,00	57,47	4938
	Западный карьер	2834	495,564	3718,95	2321,08	17,48	
	Центральный кар.	4153	190,295	4535,17	4040,22	4,58	
	Пульпохранилище	3796	40,254	3842,52	3769,98	1,06	
Fe	Северный карьер	1699	515,410	2320,72	1022,32	30,33	17505
	Западный карьер	3386	1893,804	6294,51	1309,97	55,92	
	Центральный кар.	43438	1522,638	45709,07	41025,44	3,50	
	Пульпохранилище	39505	2058,348	41842,72	37964,43	5,21	

\*Контроль – содержание в минеральных подподстилочных горизонтах почв – средние данные по Карелии (Федорец и др., 2008).

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 различных обследованных участках

различен (табл. 3). Северный карьер: содержание всех определенных тяжелых металлов ниже региональных фоновых показателей и значительно ниже ПДК. Западный карьер: субстраты не содержат повышенных концентрация тяжелых металлов, лишь количество свинца составляет 0,5 ПДК, что является потенциально опасным.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в субстратах в районе карьеров и пульпохранилища, мг/кг

Показатель	Пробная площадь	Среднее	Станд. откл.	Макс	Мин	V, %	ПДК	Контроль*
Cd	Северный карьер	0,31	0,266	0,82	0,10	84,55	3	0,5
	Западный карьер	0,49	0,153	0,70	0,33	30,73		
	Центральный карьер	нет данных	-	-	-	-		
	Пульпохранилище	нет данных	-	-	-	-		
Pb	Северный карьер	8,23	4,122	12,61	3,18	50,08	32	15,5
	Западный карьер	15,79	6,642	25,02	8,10	42,05		
	Центральный кар.	6,38	3,981	10,34	2,52	62,38		
	Пульпохранилище	4,97	0,647	5,70	4,46	13,01		
Cu	Северный карьер	8,08	1,989	11,98	6,47	24,60	100	18,5
	Западный карьер	6,08	2,713	10,98	3,07	44,61		
	Центральный кар.	73,63	2,179	77,70	71,14	2,95		
	Пульпохранилище	9,10	0,646	9,59	8,37	7,10		
Co	Северный карьер	1,43	0,753	1,96	0,89	52,64	50	11,6
	Западный карьер	2,18	1,226	3,019	0,14	60,75		
	Центральный карьер	27,33	0,844	28,35	26,07	3,08		
	Пульпохранилище	4,16	0,202	4,30	3,93	4,85		
Ni	Северный карьер	16,86	1,460	18,82	14,65	8,66	50	27,5
	Западный карьер	25,80	4,169	131,13	121,12	3,31		
	Центральный кар.	34,05	18,641	57,45	11,88	54,74		
	Пульпохранилище	41,48	1,555	43,17	40,11	3,74		
Zn	Северный карьер	16,50	14,084	45,14	9,66	85,32	300	37,2
	Западный карьер	11,22	16,367	3,95	6,15	35,22		
	Центральный кар.	126,53	8,981	136,25	110,95	7,098		
	Пульпохранилище	20,47	4,339	24,84	16,16	21,19		
Cr	Северный карьер	7,64	1,686	9,62	5,80	22,04	100	37,2
	Западный карьер	10,47	7,589	24,21	3,43	7,24		
	Центральный кар.	146,66	5,901	155,66	142,31	4,02		
	Пульпохранилище	25,12	1,424	26,27	23,52	5,66		
Mn	Северный карьер	24,27	9,131	37,11	13,70	37,62	1500	282
	Западный карьер	157,56	44,070	239,92	116,45	27,97		
	Центральный кар.	859,10	43,150	912,59	793,61	5,023		
	Пульпохранилище	366,54	60,325	434,23	318,46	16,45		

\*Контроль – содержание в минеральных подподстильных горизонтах почв – средние данные по Карелии (Федорец и др., 2008).

Центральный карьер: здесь наблюдается загрязнение субстрата, накопление свинца составляет 0,4 ПДК, количество меди приближается к 1 ПДК и превышает фон в 7,5 раз, содержание кобальта в 2 раза выше фона и составляет при этом 0,6 ПДК, количество никеля выше фона и составляет 0,7 ПДК, накопление цинка выше фоновых показателей в 3 раза и составляет 0,6 ПДК, количество хрома выше фона в 4 раза и составляет 1,5 ПДК, марганец превышает фон в 4 раза. Пульпохранилище: в субстрате накапливается никель и на период наблюдений его концентрация выше фона и приближается к 1 ПДК, количество хрома оставляет 0,4 ПДК, а содержание марганца выше фона и составляет 1,2 фоновой концентрации.

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее загрязненными являются субстраты центрального карьера и пульпохранилища. Что касается агрохимических свойств исследованных субстратов, то предположительно они могут обеспечить растения – фиторемедианты необходимыми питательными элементами.

Дальнейшее исследование было выполнено на территории пульпохранилища, которое относится к наиболее загрязненным объектам ТМ (превышение ПДК по никелю, хрому, меди) и обедненным азотом – одним из наиболее важных физиологических элементов для растений.

Анализ растений. Растения *Salix schwerinii*, высаженные на пульпохранилище отличались по показателям ростовой активности. Мы разделили растения ив на две группы: с высокой продукцией биомассы (ВПБ) и с низкой продукцией биомассы (НПБ) и оценили у обеих групп растений биометрические и физиологические показатели. Наличие этих двух групп связано с большой субстратной гетерогенностью территории. Так, число побегов и их длина, среднее число листьев на побеге, содержание воды в листьях и их сухая масса у растений ив с ВПБ были выше, чем у растений ивы с НПБ. Однако длина корней у обеих групп *Salix schwerinii* не отличалась (табл. 4).

Таблица 4

Биометрические показатели растений *Salix schwerinii* у высоко (ВПБ) – и низкопродуктивных растений (НПБ), пульпохранилище

Вариант опыта	Длина корней, см	Диаметр ствола, мм	Число побегов	Длина побегов, см	Площадь листа, мм <sup>2</sup>	Число листьев\ побег	Сырая масса 10 листьев, г	Сухая масса 10 листьев, г	Содержание воды в 10 листьях, г
ВПБ	13,5±2,6	11±0,4	3,7±0,3	11,4±8,5	326±27,5	13±5	0,63±0,1	0,24±0,1	0,390±50
НПБ	14±1,79	10±0,4	5,5±1,3	8,97±5,5	273,1±17,4	9±4	0,46±0,1	0,19±0,1	0,270±48

Содержание Chl a и b в листьях растений обеих групп не отличалось. Содержание Car было выше в листьях растений ив с высокой продукцией биомассы. Показатель SLA также значимо был выше у рас-

тений ив с высокой продукцией биомассы, что косвенно свидетельствует о более высокой фотосинтетической активности растений *Salix schwerinii* с высокой продукцией биомассы (табл. 5).

Таблица 5

Содержание фотосинтетических пигментов и показатель SLA *Salix schwerinii* у высоко (ВПБ) – и низкопродуктивных растений (НПБ), пульпохранилище

Вариант опыта	SLA, мм <sup>2</sup> /мг	Содержание пигментов мг/г сухой массы				
		Общее	Chl a	Chl b	Car	a/b
ВПБ	1,53±0,07	1,686±0,155	0,965±0,144	0,577±0,186	0,144±0,07	1,8
НПБ	1,21±0,05	1,546±0,198	0,885±0,200	0,533±0,206	0,128±0,005	1,8

Накопление тяжелых металлов в тканях и органах растений ив разных биометрических групп, выращиваемых на пульпохранилище, показало, что органами, накапли-

вающими наибольшие количества тяжелых металлов, являются корни, листья и кора растений. Меньше всего тяжелых металлов в древесине (табл. 6, 7).

Таблица 6

Коэффициент биологического поглощения и содержание тяжелых металлов (мг/кг) в тканях и органах *Salix schwerinii*, пульпохранилище

Металл	Cd		Pb		Cu		Zn	
	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ
Органы и ткани растения								
Корни	0,50±0,15	0,26±0,15	4,88±2,01	4,17±1,85	28,10±5,86	5,30±2,13	46,60±8,23	24,10±2,18
Листья	0,23±0,07	0,44±0,09	3,08±1,06	6,50±2,56	5,60±1,25	23,6±4,85	25,00±5,89	49,00±3,25
Старая кора (побеги 1 года жизни)	1,23±0,05	0,85±0,13	2,51±0,89	1,80±0,09	5,60±2,54	4,9±1,07	58,20±6,01	57,30±5,87
Новая кора (побеги текущего года жизни)	0,77±0,25	0,55±0,14	0,35±0,09	1,25±0,07	3,10±0,28	2,90±0,09	51,50±4,09	50,90±2,89
Древесина	0,25±0,09	0,19±0,02	3,06±1,28	1,08±0,05	6,20±2,14	4,10±1,06	20,20±2,45	18,90±3,92
КБП	7,4	5,9	2,1	2,1	5,0	4,10	8,2	8,1
Листья ивы на загрязненных почвах	12,5*	23-180**	30-50*	1126*				
Листья ивы, фон	0,2-0,8*	0,1-10*	4-15*	15-200*				

(Литературные данные\* Stoltz, Greger., 2002; \*\*Zhivotovsky et al., 2011).

Согласно коэффициенту биологического поглощения ряд накопления тяжелых металлов в целом растении следующий  $Zn > Mn > Cd > Cu > Pb > Co > Ni = Cr > Fe$ .

Листья ивы с пульпохранилища накапливают никель, марганец и железо в той же степени, что и ивы в других условиях загрязнённых почв (Pulford et al., 2002; Meers et al., 2007). Что касается остальных металлов, то концентрация их в листья ниже, чем у растений, выращенных на более загрязнённых почвах. Это может быть связано

с более коротким периодом выращивания (один год) или с более низкой степенью загрязнения субстратов в районе исследования, чем данные в литературе (содержание ТМ составляло несколько единиц ПДК).

Сравнивая химический состав листьев ивы, выращенных в нашем опыте около пульпохранилища с фоновыми показателями [8;5;4;1] можно отметить увеличение содержания накопление таких элементов как: кобальт, никель, хром, марганец, железо, медь и цинк.

Таблица 7

Коэффициент биологического поглощения и содержание тяжелых металлов (мг/кг) в тканях и органах *Salix schwerinii*, пульпохранилище

Металл	Co		Ni		Cr		Mn		Fe	
	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ	ВПБ	НПБ
Органы и ткани растения										
Корни	3,26±1,02	0,92±0,08	17,67±2,28	2,96±0,25	4,62±0,23	2,96±0,87	1418±80	363±37	4349±65	3342±284
Листья	0,61±0,09	4,23±1,04	4,20±2,25	17,98±1,01	6,66±2,87	2,58±0,54	334±54	2022±57	3061±25	4292±183
Старая кора (побеги 1 года жизни)	0,39±0,09	0,28±0,05	0,92±0,03	3,22±1,05	2,36±1,84	4,17±1,47	246±45	313±58	497±98	1199±108
Новая кора (побеги текущего года жизни)	0,19±0,08	0,17±0,07	1,12±0,05	1,84±0,06	2,17±0,58	1,75±0,91	184±25	202±15	507±58	725±105
Древесина	0,06±0,01	0,11±0,02	0,05±0,01	0,64±0,08	1,82±0,47	1,66±0,25	45±14	55±10	93±19	161±23
КБП	1,0	1,3	0,6	0,6	0,7	0,5	6,0	7,9	0,2	0,2
Листья ивы на загрязненных почвах	-	12*	7,5**	2012**	283**					
Листья ивы, фон	1,76***	1-4*	0,33**	310***	-					

(Литературные данные: \*Meers et al., 2007; \*\* Pulford et al., 2002; \*\*\* Кашулина, Салтан, 2008).

Наблюдается существенная разница в накоплении ТМ в корнях и листьях у ВПБ и НПБ растений. Корни ив с высокой продукцией биомассы накапливают металлов в несколько раз больше, по сравнению с корнями растений ивы с низкой продукцией биомассы. Так, меди больше в корнях в 5 раз, никеля в 6 раз, кобальта и марганца в 3 раза и цинка с хромом в 2 раза у ив с ВПБ, по сравнению с корнями низкопродуктивных растений. И наоборот листья ВПБ растений накапливают металлов в разы меньше, чем листья растений НПБ. Например, кадмия, свинца и цинка меньше в 2 раз, кобальта в 7 раз, марганца в 6 раз, а меди и никеля 4,5 раза меньше в листьях высокопродуктивных растений, по сравнению с листьями низкопродуктивных растений. То есть ивы с высокой продуктивностью аккумулируют основную часть потока тяжелых металлов в корнях, препятствуют их транспорту в листья. Возможно, это связано с активным протеканием физиологических процессов у высокопродуктивных растений ивы (синтез переносчиков металлов, хелатов в корнях), что обеспечивает их повышенную функциональную активность.

Проведенные исследования показали, что наличие тяжелых металлов в субстрате пульпохранилища оказалось в доступном для экстракции виде, что обеспечило их поглощение обоими группами растений (ВПБ и НПБ). Однако более высокая функциональная активность группы морфологически лучше развитых растений (ВПБ) смогла обеспечить утилизацию ТМ в корневой системе, препятствуя их передвижению в наземные органы. Полученные данные показали, что климатические и техногенные условия территории ОАО «Карельский окатыш» соответствуют технологии использования ивы Шверина в качестве фиторемедианта на техногенно-нарушенных территориях. Одним из важных условий успешности этой работы является подбор качественного растительного материала, который обладает высокой функциональной активностью в условиях водно-почвенного загрязнения и создание оптимальных усло-

вий минерального питания растений-фиторемедиантов.

Выражаем благодарность С.Л. Ерофеевской за проведение анализов, сотрудникам отдела экологии ОАО «Карельский окатыш» О.В. Крупеня и В.В. Васильевой за организацию работы на территории комбината

*Работа выполнена при финансовой поддержке Международного гранта Программы ЕИСП ПГС Карелия: «Развитие лесных плантаций на отвалах карьеров, их облесение и фитоочистка в России и Финляндии».*

#### Список литературы

1. Кашулина Г.М., Салтан Н.В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». – Апатиты: Изд-во: КНЦ РАН, 2008. – 235 с.
2. Федорев Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н. Морозов А.К. Почвы Карелии: геохимический атлас. – Москва: Изд-во Наука, 2008. – 47 с.
3. Brooks R.R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. – Wallingford, UK: CAB Intl., 1998. – 381 p.
4. Meers E., Vandecasteele B., Ruttens A., Vangronsveld J., Tack F.M.G. Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals // *Environmental and Experimental Botany*. 2007. Vol. 60. P. 57–68.
5. Pulford I.D., Riddell-Black D., Stewart C. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: the potential for phytoremediation // *International Journal of Phytoremediation*. 2002. Vol. 4. P. 59-72.
6. Salt D.E., Blaylock M., Nanda Kumar P.B.A., Dushenkov V., Ensley B., Chet I., Raskin I. Phytoremediation: a Novel Strategy of the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants // *Biotechnology*. 1995. Vol. 13. P. 468-474.
7. Shaojun Xiong, Quan-Guo Zhang, Da-Yong Zhang, Rolf Olsson. Influence of harvest time on fuel characteristics of five potential energy crops in northern China // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 479–485.
8. Stoltz E., Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings // *Environ. Exp. Botany*. 2002. Vol. 47. P. 271–280.
9. Vandecasteele B., Meers E., Vervaeke P., De Vos B., Quataert P., Tack F.M.G. Growth and trace metal accumulation of two *Salix* clones on sediment-derived soils with increasing contamination levels // *Chemosphere*. 2004. Vol. 58. P. 995–1002.
10. Zhivotovsky O.P., Kuzovkina J. A., Schulthess C.P., Morris T., Pettinelli D., Ge M. Hydroponic screening of willows (*Salix* L.) for lead tolerance and accumulation // *International Journal of Phytoremediation*. 2011. Vol. 13. P. 75–94.