

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И ШУНГИТОВОЙ КРОШКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО (*AVENA SATIVA* L.) В ЗАКРЫТОМ ГРУНТЕ

Е.Н. Теребова^{1✉}, Н.В. Орешникова², М.А. Павлова¹, А.А. Стародубцева¹

¹ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33

²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

eterebova@gmail.com

Представлены материалы исследования возможности применения коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в лабораторном эксперименте в течение 70 сут. Проанализированы ростовые показатели, содержание фотосинтетических пигментов листа (хлорофиллы А, В, каротиноиды), содержание макроэлементов (С, N, P, K, S, Fe, Mg) и микроэлементов (Al, Zn, Cu), рассчитаны коэффициенты биологического поглощения металлов корнями, надземными органами и всем растением овса посевного. Выполнены работы по обогащению грунтов макро- и микроэлементами до оптимальных (Fe, Mg, Mn) и загрязняющих уровней (Cu, Zn, Ni, S), при добавлении шунгита в универсальный грунт (контрольный образец) в концентрациях 10 г/кг отдельно и совместно с корой. Показана стимуляция ростовых процессов растений овса с их последующем замедлением в конце эксперимента при использовании и коры, и шунгита в субстратах. Установлено, что шунгитовые добавки на начальных этапах онтогенеза растений эффективнее стимулировали рост, чем коровые, а кора и шунгит в грунтах не влияли на фотосинтетическую функцию овса. Выявлено накопление растениями в условиях использования в субстратах коры и шунгита Zn, Cu и Mn до нормальных, а Fe, Al и S — до критических уровней содержания. Сделан вывод, что кору сосны обыкновенной можно безопасно и с положительным эффектом оптимизации минерального питания растений применять в агротехнологиях.

Ключевые слова: кора, сосна обыкновенная, шунгит, овес посевной, макро- и микроэлементы, коэффициенты биологического поглощения

Ссылка для цитирования: Теребова Е.Н., Орешникова Н.В., Павлова М.А., Стародубцева А.А. Использование коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки для выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в закрытом грунте // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 55–69.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

Шунгитовая крошка и кора древесных растений представляют собой отходы горно- и деревообрабатывающих производств. Эффективность использования древесины можно повысить с помощью энергосберегающих технологий и комплексного использования получаемых отходов. Проблема все более требует оптимизационного решения и приобретает особую значимость для предприятий, которые в результате переработки древесины получают большой объем отходов в виде коры, опилок и щепы, не имеющих сбыта.

В России в результате деятельности предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК) ежегодно образуется примерно 68...74 млн м³ древесных отходов, и лишь 48...58 % этого объема перерабатывается [1], большая часть коры сжигается [2].

Ученые разных стран осуществляют поиск оптимальных способов использования коры как сырья для химической и фармацевтической промышленности, нужд сельского хозяйства и производства волокнистых полуфабрикатов [3].

В 2010–2020-е годы повысилась интенсивность химической обработки коры, и расширилось получение из нее различных соединений, получило развитие производство на основе коры стружечных, волокнистых и теплоизоляционных плит, композиционных материалов, сырья для очистки воды и газов, что указывает на перспективность ее применения в качестве уникального природного материала и возобновляемого ресурса.

Данные наблюдений свидетельствуют о том, что разложение коры с выделением тепла обуславливает комфортные условия для жизнедеятельности растений, способствуя их развитию и росту. Кора древесных растений содержит около 85 % органических веществ, легкоразлагаемая часть коры стимулирует биологическую активность почвы и служит источником минеральных и органических веществ, используемых растениями в процессе жизнедеятельности [4]. Кора хвойных видов растений проявляет большую устойчивость к микробиологическому разложению, нежели кора лиственных видов растений, и поэтому нуждается в более тонком измельчении и тщательном подборе доз азотсодержащих добавок.

О микробиологических процессах, происходящих в коре при ее хранении, можно судить по изменению соотношения углерода и азота (C:N). Кора хвойных видов растений содержит комплекс веществ, обладающих высокой биологической активностью и представляющих практически все классы органических соединений, которые встречаются в растениях, в частности экстрактивные вещества [5]. В зависимости от вида растения содержание минеральных веществ в коре существенно различается, изменяясь в диапазоне 1...10 %. В золе коры обнаружены такие макроэлементы, как С, N, К, Р, Са, Mg, Fe, и такие микроэлементы, как Al, Mn, Mo, Zn, Cu, В, S, Na, Ni, Cr [6]. В технологиях выращивания растений кора используется для их обогащения элементами (N, P, K), улучшения газо- и водопроницаемости грунтов и субстратов [7].

Шунгитовые породы — природное углерод-содержащее сырье, весьма распространенное. В частности, в Республике Карелия, выявлено месторождение шунгита, уникальное по условиям образования, объему промышленных запасов, строению вещества. Шунгиты характеризуются разнообразными физико-химическими свойствами и направлениями их практического использования. В составе шунгитов насчитывается 62 элемента [8], в том числе макроэлементы — С, К, Са, Mg, Fe и микроэлементы — Na, Al, Cu, Zn, Mo, Mn, Cr, S, необходимые для жизнедеятельности растений. Богатство элементного состава и благоприятные тепловые свойства шунгитовых пород повышают плодородие почв, которые на них сформированы. Такие почвы наиболее устойчивы к антропогенному воздействию вследствие их высоких буферных способностей [9].

Шунгитовые породы можно использовать в металлургии [10]. Они являются эффективными адсорбентами в технологиях очистки воды [11], применяются в качестве активного наполнителя композиционных материалов для придания им новых уникальных качеств: повышенной износостойкости, химической стойкости и электропроводности [12]. Шунгитовые породы обладают радиоэкранирующими свойствами, на их основе получены новые материалы, обеспечивающие защиту человека от техногенных электромагнитных излучений [13]. Перспективная роль шунгита для полезного изменения свойств грунтов и субстратов для выращивания растений предсказывалась издавна. Так, уже в 1940-е годы в Карелии шунгит рассматривался как возможное удобрение [14]. Современные исследования показали положительное влияние шунгита на оптимизацию минерального питания лука репчатого (*Allium cepa* L.) в условиях нарушения водного режима на начальных этапах онтогенеза растений [15]. Шунгит

повышает устойчивость к условиям перезимовки таких растений, как клевер красный (*Trifolium pretense* L), донник белый (*Melilotus albus* Desr), люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) [16].

Таким образом, кора древесных растений и шунгит благодаря разнообразному элементному составу могут обогащать грунт для выращивания растений, влиять на минеральный обмен и основные физиологические процессы растительного организма. В то же время кора — ткань древесных растений, которая активно накапливает поллютанты (металлы, оксиды серы и азота), выводя их из процессов жизнедеятельности растения [17, 18], и оптимизированные корой грунты могут загрязняться токсичными элементами до критических значений. Шунгитовые породы содержат *d*-элементы (тяжелые металлы), *f*-элементы (лантаноиды), соединения серы в разных концентрациях [19], которые могут загрязнять почву и воды [20, 21]. Вопрос о влиянии коры и шунгита на развитие растений и депонирование ими элементов до критических значений остается открытым.

Цель работы

Цель работы — оценка роста, развития и накопления элементов овсом посевным (*Avena sativa* L.) в вегетационном эксперименте при выращивании на субстратах с добавлением отходов камне- и деревообработки (шунгит, кора).

Материалы и методы

Объект исследования. Овес посевной (*Avena sativa* L.) — однолетнее травянистое растение высотой 20...150 см с мочковатой корневой системой. Имеет широкий ареал распространения, обитает на всех континентах, за исключением прибрежной зоны Средиземноморья, Северной и Юго-Восточной Азии. Овес влаголюбив, холодостоек. Вегетационный период длится от 70 до 110 сут., в зависимости от условий выращивания. Овес переносит повышенную кислотность почвы, хорошо растет на супесчаных, суглинистых, глинистых и торфяных почвах, отзывчив на удобрения. Используется для лабораторного выращивания при отработке агротехнических технологий.

Схема эксперимента. Овес посевной (*Avena sativa* L.) выращивается в течение 70 сут. до фазы цветения на грунтах с добавлением коры, шунгита в вегетационном эксперименте. В вегетационные сосуды помещали четыре варианта грунта:

1) универсальный грунт (УГ), контрольный образец;

2) универсальный грунт и среднеразмельченная (3...7 мм) трехлетняя кора сосны обыкновенной (УГ+К), в концентрации 10 г/кг;

3) универсальный грунт и шунгитовая крошка (УГ+Ш) Зажогинского месторождения, в концентрации 10 г/кг;

4) универсальный грунт, размельченная кора (в концентрации 10 г/кг) и шунгитовая (УГ+К+Ш) крошка (в концентрации 10 г/кг).

В каждом варианте было пять вегетационных сосудов. Универсальный грунт («Терра Вита») содержал макроэлементы в соотношении N:P:K равном 150:270:300 (мг/л) в виде солей и оксидов K_2SO_4 , Na_2SO_4 , P_2O_5 , K_2O , NH_4NO_3 . Грунт (понятия грунт и субстрат используются как синонимы) был следующего состава: верховой торф различной степени разложения — 70...80 %; биогумус — 10; песок намывной — 5, агроперлит — 6...8 %, мука известняковая (доломитовая), рН солевой 6,0...6,5.

Температура выращивания 20...23 °С, фотосинтетическая активная радиация (ФАР) 220 мкмоль/(м²·с), фотопериод 12 ч и относительная влажность воздуха 50 %. Семена высевали в вегетационные сосуды объемом 500 мл с субстратом, плотность посева составляла 50 растений на один сосуд. Полив осуществляли дистиллированной водой, влажность субстрата поддерживалась на уровне 60...70 %. Шунгитовая крошка была с Зажогинского месторождения (Медвежьегорский район Республики Карелия), на котором добывают высокоуглеродистые шунгитовые породы (табл. 1). Эффективная удельная радиоактивность ($A_{эфф}$) шунгитовой крошки составляла 151 Бк/кг (1 класс безопасности (≤ 370 Бк/кг) в соответствии с СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности»).

Ростовые показатели растений (длину корня, стебля, массу листьев), содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла А, В и каротиноидов в мг/г сырого веса) листа оценивали спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Спектр 2001) [22], общее содержание хлорофилла (А+В) в относительных единицах (хлорофилльный индекс) определяли с помощью прибора AtLeaf+, содержание элементов в корнях и надземных органах овса посевного. Элементный состав растений и грунтов определяли на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук». Содержание тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония).

В работе представлены средние арифметические значения валового содержания тяжелых металлов в корнях и надземной массе растений после 70 сут. выращивания, а также в исходных грунтах и в грунтах, оставшихся после выращивания растений. Содержание N, K, P, S, S в

Т а б л и ц а 1

Химический состав шунгита Зажогинского месторождения

Chemical composition of shungite
from the Zazhoginskoye deposit

Вещество	Содержание, %	Вещество	Содержание, %
SiO ₂	57,0	TiO ₂	0,2
Al ₂ O ₃	4,3	Na ₂ O	0,2
FeO	2,8	S	1,5
K ₂ O	1,5	C	28,0
MgO	1,2	H ₂ O _{кр}	3,0
CaO	0,3		

растениях и грунтах определяли по известным методикам [22, 23].

Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов, характеризующий способность растений поглощать металлы из среды, рассчитывали как отношение содержания металла в растении к его содержанию в грунте в конце эксперимента. Грунт отбирали непосредственно в зоне корней растений. Значения КБП металлов рассчитывали в целом растении, корнях и надземных частях — стебле и листьях.

Статистическая обработка данных. Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Фишера (Fisher's LSD test) с учетом объема сравниваемых совокупностей и порога доверительной вероятности 0,95 (программа Statgraphics 2.1 для Windows).

Результаты и обсуждение

Анализ ростовой активности растений показал, что длина стебля овса посевного была достоверно выше на 15...30 % по сравнению с контрольным образцом (УГ) во всех вариантах эксперимента: в начале выращивания — на 15...30 сут. и в середине выращивания — на 40-е...50-е сут. При этом максимальные отличия в ростовой активности (45 %) при добавлении коры сосны обыкновенной и шунгита зафиксированы на начальных этапах онтогенеза растений, в частности шунгитовые добавки эффективнее увеличивали длину стебля овса посевного. В конце эксперимента длина стебля была больше только при добавлении коры и шунгита совместно в грунт (УГ+К+Ш), а в остальных вариантах эксперимента рост растений замедлился (рис. 1). Кроме того, в ходе эксперимента измеряли площадь листьев и сырую массу надземных и подземных органов. Отличий по этим показателям выявлено не было. Длина корней растений (см), измеренная в конце эксперимента, составила $19,3 \pm 0,7$ (УГ), $22,9 \pm 0,7$ (УГ+К), $18,1 \pm 1,1$ (УГ+Ш) и $18,9 \pm 0,5$ (У+К+Ш) см, т. е. была максимальной во втором варианте выращивания (с корой).

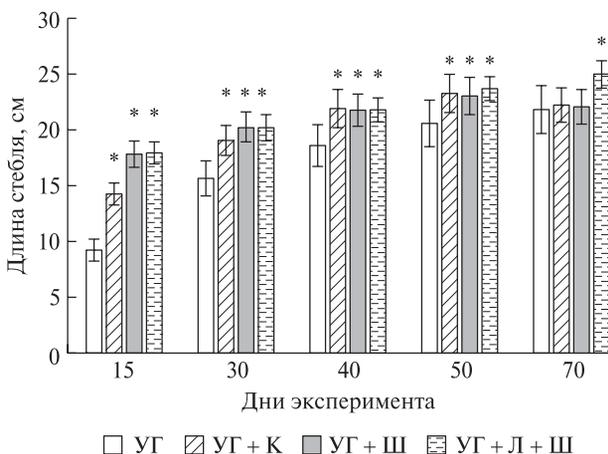


Рис. 1. Изменение длины (см) стебля овса посевного (*Avena sativa* L.) в ходе эксперимента при выращивании на разных вариантах субстрата: УГ — универсальный грунт (контрольный образец), К — кора, Ш — шунгит (звездочкой отмечены значения, достоверно отличающиеся от контрольного образца ($p \leq 0,05$))

Fig. 1. Change in stem length (cm) of sown oats (*Avena sativa* L.) during the experiment when grown on different substrate variants: УГ — universal soil (control sample), К — bark, Ш — shungite (asterisk indicates values significantly different from the control sample ($p \leq 0,05$))

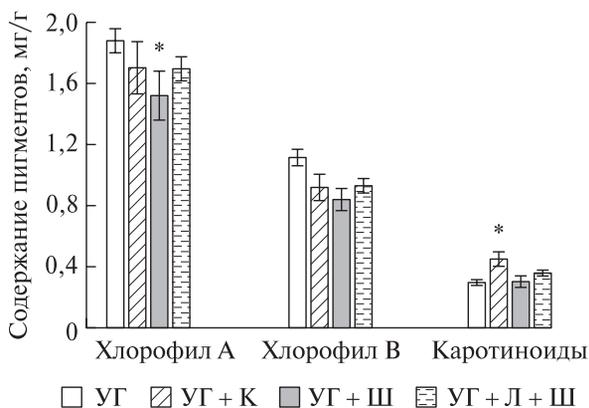


Рис. 2. Содержание хлорофиллов А, В и каротиноидов (мг/г) в листьях овса посевного (*Avena sativa* L.) в конце эксперимента при выращивании на разных вариантах субстрата (усл. обозначения см. рис. 1; звездочкой отмечены значения, достоверно отличающиеся от контрольного образца ($p \leq 0,05$))

Fig. 2. Content of chlorophylls A, B and carotenoids (mg/g) in leaves of sown oats (*Avena sativa* L.) at the end of the experiment when grown on different substrate variants (see Fig. 1; asterisk indicates values significantly different from the control sample ($p \leq 0,05$))

Содержание фотосинтетических пигментов листа растений овса посевного в конце эксперимента (70-е сут.) достоверно не отличалось при добавлении в субстрат коры и шунгита. При этом содержание каротиноидов в листе при выращивании на субстрате с корой увеличилось (рис. 2). У растений не проявились хлороз и некроз листьев во всех условиях выращивания. В течение

всего эксперимента общее содержание хлорофилла листьев овса (AtLeaf+) было на уровне 35...40 отн. ед. и не зависело от условий наполнения субстратов при выращивании.

Элементный состав грунтов и растений. Добавление коры сосны обыкновенной и шунгитовой крошки в концентрациях 10 г/кг в субстраты для выращивания овса посевного отразилось на элементном составе исходных грунтов. Так, при добавлении коры (УГ+К) отмечено увеличение содержания Mn, Zn и Mg в 1,5...2 раза; при добавлении шунгита (УГ+Ш) увеличилось содержание — Fe в 8, Cu в 22, Zn в 14, Pb в 9, Ni в 11 раз, Mn — в 1,2 раза. При совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш) содержание Fe, Mg, Cu, Zn, Pb, Ni и Mn также многократно повысилось по сравнению с контрольным образцом (табл. 2).

Содержание Cu, Zn и Ni в исходных грунтах с шунгитом превышало ПДК для почв. Валовое содержание элементов [57]:

кларк элемента в земной коре, по А.В. Виноградову, мг/кг:

- Fe46 500
- Mg.....18 700
- Al.....80 500
- ПДК:
- S.....0,016 %
- Cu.....33 мг/кг
- Zn.....55 мг/кг
- Mn.....1500 мг/кг
- Pb.....65 мг/кг
- Ni.....20 мг/кг

После выращивания растений в течение 70 сут. содержание Fe, Mg, Cu, Zn в грунтах с корой (УГ+К) и шунгитом (УГ+Ш+К) значительно уменьшилось (см. табл. 2) вследствие поглощения металлов растениями овса посевного. Нами проанализировано накопление растениями овса пяти элементов металлов, имеющих наибольшее процентное содержание в шунгитовых породах, в частности Fe, Al, Mg, Cu и Zn (рис. 3, табл. 3).

Железо. Критический уровень содержания Fe в растениях более 300...600 мг/кг [24]. При добавлении шунгита (1772 мг/кг) оно увеличилось в 4 раза и при добавлении и коры и шунгита (1082 мг/кг) — в 2,5 раза до значений, превышающих нормальный уровень содержания Fe у растений. Основное количество Fe (85 %) накапливалось в корнях овса. При всех условиях выращивания КБП Fe был невысоким — 0,10...0,18. Добавление коры снижало поглощение Fe овсом: КБП всем растением снижался с 0,18 до 0,13.

Алюминий. Содержание Al у растений в ненарушенных условиях обитания существенно изменяется в пределах от 50 до 1000 мг/кг в надземных органах и до 2100 мг/кг — в корнях [25, 26].

Т а б л и ц а 2

Содержание элементов в различных типах грунтов (исходном и конечном) до и после эксперимента

Element content in different types of soil (initial and final) before and after the experiment

Вариант грунта	Тип грунта	Содержание								
		%	мг/кг							
			S	Fe	Mg	Al	Cu	Zn	Mn	Pb
1) УГ	Исходный	–	2780 ± 302	2300 ± 150	–	4,89 ± 1,02	10,71 ± 3,25	52,27 ± 2,56	2,41 ± 0,89	5,73 ± 1,78
	Конечный	0,19 ± 0,03	4530 ± 736	2197 ± 262	1023 ± 316	4,28 ± 0,38	4,21 ± 0,20	–	–	–
2) УГ+К	Исходный	–	2735 ± 351	2852 ± 214	–	6,99 ± 0,89	14,59 ± 2,87	87,40 ± 7,52	2,26 ± 1,13	4,86 ± 0,85
	Конечный	0,12 ± 0,01	2081 ± 125	2675 ± 210	689 ± 35	2,09 ± 0,28	4,50 ± 0,39	–	–	–
3) УГ+Ш	Исходный	–	24103 ± 3500	3141 ± 250	–	90,41 ± 7,89	151,74 ± 30,47	54,73 ± 10,25	20,51 ± 0,12	64,57 ± 6,89
	Конечный	0,30 ± 0,09	9615 ± 2988	2056 ± 221	870 ± 105	12,65 ± 5,19	14,05 ± 13,15	–	–	–
4) УГ+К+Ш	Исходный	–	20392 ± 2210	3057 ± 310	–	79,36 ± 10,11	158,15 ± 12,87	66,88 ± 8,25	22,44 ± 4,98	63,48 ± 9,23
	Конечный	0,41 ± 0,12	8261 ± 1500	2680 ± 245	1212 ± 85	19,42 ± 1,97	36,66 ± 2,84	–	–	–

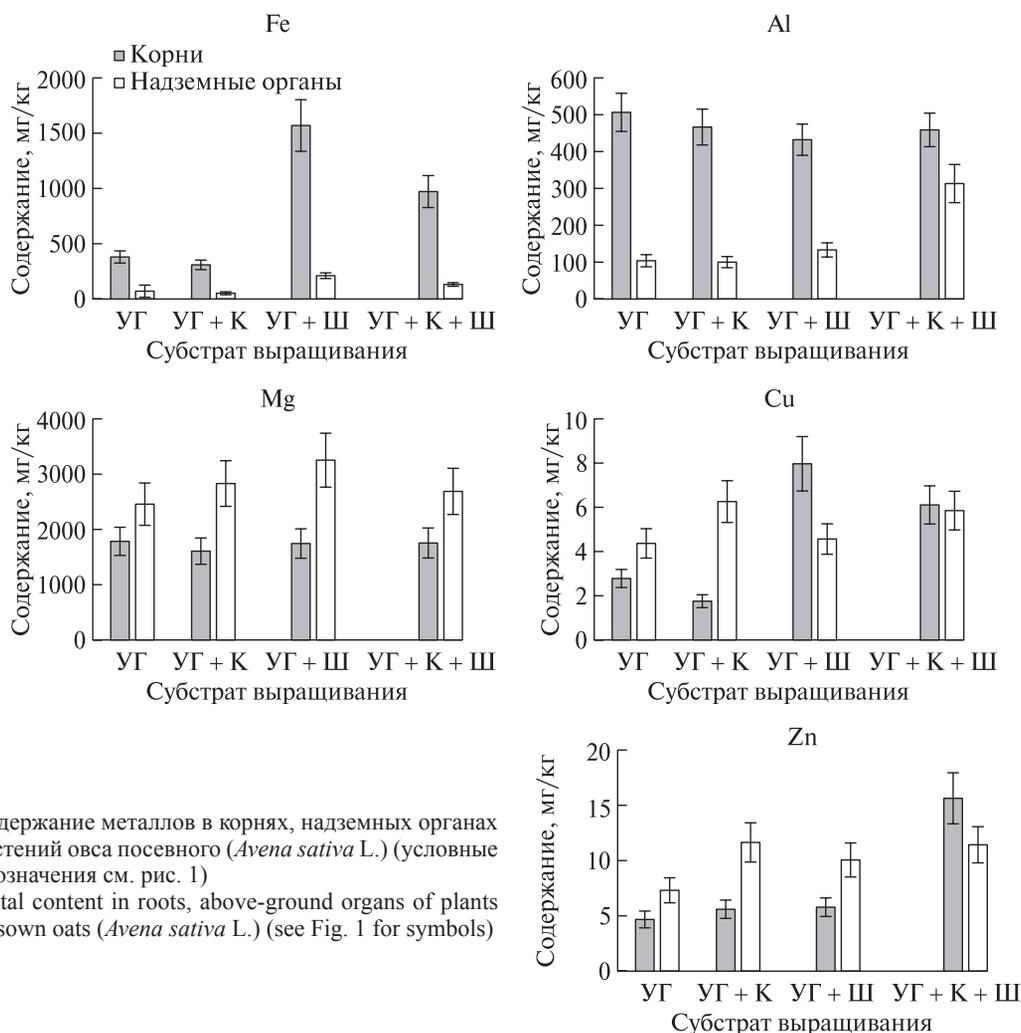


Рис. 3. Содержание металлов в корнях, надземных органах растений овса посевного (*Avena sativa* L.) (условные обозначения см. рис. 1)

Fig. 3. Metal content in roots, above-ground organs of plants of sown oats (*Avena sativa* L.) (see Fig. 1 for symbols)

Т а б л и ц а 3

Коэффициент биологического поглощения металлов (отн. ед.) корнями, надземными органами и всем растением овса посевного (*Avena sativa* L.)

Coefficient of biological absorption of metals (relative units) by roots, aboveground organs and the whole plant of sown oats (*Avena sativa* L.)

Вариант грунта	Органы растений	Fe	Mg	Al	Cu	Zn
1) УГ	Корни	0,08	0,81	0,50	0,66	1,99
	Надземные органы	0,02	1,11	0,10	1,03	3,07
	Все растение	0,10	1,92	0,60	1,68	5,06
2) УГ+К	Корни	0,15	0,60	0,68	0,87	2,21
	Надземные органы	0,02	1,06	0,15	3,00	4,56
	Все растение	0,17	1,66	0,82	3,87	6,77
3) УГ+Ш	Корни	0,16	0,85	0,50	0,67	0,73
	Надземные органы	0,02	1,59	0,15	0,38	1,26
	Все растение	0,18	2,44	0,65	1,05	1,99
4) УГ+К+Ш	Корни	0,32	0,65	0,30	0,32	0,75
	Надземные органы	0,30	1,01	0,26	0,30	0,55
	Все растение	0,62	1,66	0,56	0,62	1,29

Содержание Al у растений овса посевного было на уровне 500...600 мг/кг при выращивании в контрольном образце; с корой и с шунгитом — достоверно не отличалось. Основная доля Al (83 %) накапливалась в корнях растений. При совместном использовании коры и шунгита в субстратах (УГ+К+Ш) накопление Al в растениях значительно увеличилось и составило 781 мг/кг, за счет увеличения накопления металла в надземных органах. Для Al КБП составлял 0,56...0,82 всем растением и 0,30...0,68 его корнями. При этом добавление коры снижало поглощение Al корнями: КБП всем растением снижался с 0,65 до 0,56.

Магний. Mg, макроэлемент, количество которого у растений в норме может достигать до 14 000 мг/кг (листья амаранта *Amaranthus hypochondriacus* L.) [27]. Растения овса содержали в среднем 4300 мг/кг Mg в контрольном образце грунта и при добавлении коры (УГ+К) и шунгита (УГ+Ш). В условиях совместного использования коры и шунгита количество Mg в растениях было существенно выше — до 5008 мг/кг. При этом большая часть Mg (60 %) содержалась в надземных органах овса. Для Mg КБП всем растением составлял 1,66...2,44, в шунгитном субстрате был максимальным - 2,44.

Медь. Критический уровень содержания микроэлемента Cu у растений более 40 мг/кг [24]. При использовании шунгита (УГ+Ш) и совместно

коры и шунгита (УГ+К+Ш) в субстрате растения накапливали в 2 раза больше Cu (до 12 мг/кг) по сравнению с контрольным образцом. При этом в корнях значимо увеличилось содержание Cu — до 6...8 мг/кг. Значительно варьировал КБП Cu всем растением и был равен 0,62...3,87, максимальное значение зафиксировано при наличии коры в грунте. Однако при наличии шунгита в субстрате кора снижала поглощение Cu корнями овса, КБП всем растением снижался с 1,05 до 0,62.

Цинк. Критический уровень накопления микроэлемента Zn растениями более 100 мг/кг [24]. Во всех вариантах эксперимента содержание цинка в растениях овса посевного увеличивалось до 27...30 мг/кг при отдельном использовании и коры (УГ+К), и шунгита (УГ+Ш), и максимально при совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш) — до 48 мг/кг. В последнем случае увеличение накопления металла произошло за счет его накопления в корнях растений. В широком диапазоне изменялось значение КБП Zn всем растением — от 1,99 до 6,77. При наличии коры и шунгита КБП уменьшался по сравнению с контрольным образцом, и был минимальным (1,29) в варианте УГ+К+Ш

Содержание элементов неметаллов в растениях овса посевного после выращивания на грунтах с корой и шунгитом представлено на рис. 4. Можно отметить повышенное содержание С (43 %) в корнях в варианте УГ+К+Ш, К (7,63 %) и Р (1,37 %) в надземных органах в варианте УГ+К и значительное увеличение S (до 0,41 %) в корнях, и особенно в надземных органах, при добавлении шунгита (УГ+Ш), коры и шунгита (УГ+К+Ш). Критический уровень содержания S у растений значительно изменяется, в зависимости от вида и фазы онтогенеза растения от 0,5 до 1,8 % [28]. В то же время при добавлении шунгита в грунт количество Р достоверно снижалось до 0,7...0,8 % в надземных органах овса по сравнению с контрольным образцом.

Таким образом, при выращивании овса посевного кора и шунгит обогащали грунты металлами и S, которые накапливались в корнях и надземной массе растений. Содержание Zn, Cu и Mn было оптимальным, а содержание Fe, Al приближалось к критическим уровням у растений. Добавление коры в грунт повышало у растений количество дефицитных макроэлементов — Р, К и элемента С, добавление шунгита увеличивало уровень S и снижало количество N и К в растениях.

Нами исследованы рост, развитие и содержание элементов в корнях и надземных органах растениями овса посевного (*Avena sativa* L.) при выращивании на субстратах с корой сосны обыкновенной и шунгитовой крошкой в длительном вегетационном эксперименте.

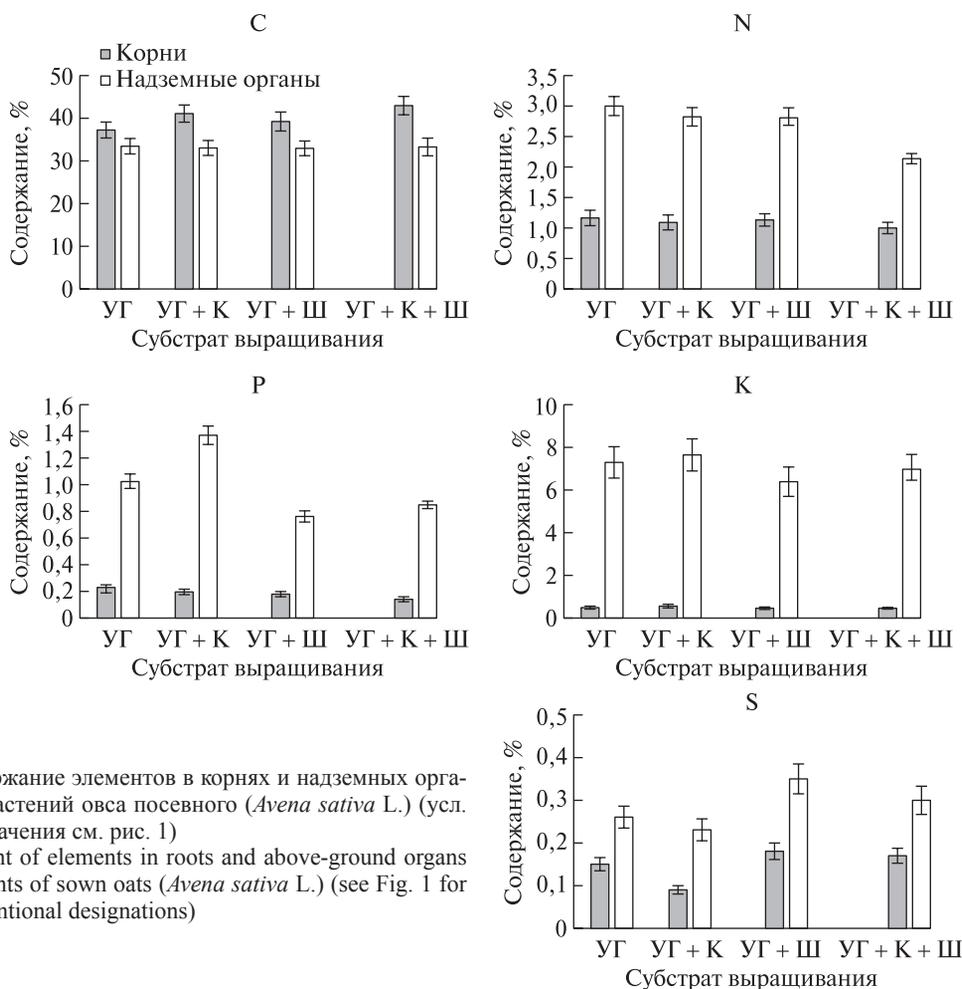


Рис. 4. Содержание элементов в корнях и надземных органах растений овса посевного (*Avena sativa* L.) (усл. обозначения см. рис. 1)

Fig. 4. Content of elements in roots and above-ground organs of plants of sown oats (*Avena sativa* L.) (see Fig. 1 for conventional designations)

Кора сосны обыкновенной богата макро- и микроэлементами: Са 83,7...89,9 %; К 4,2...5,0; Fe 3,0...6,2; Mg 2,0...2,8; Mn 1,0...2,4; Zn до 0,3; Си до 0,05 % [29]. За счет оптимального минерального состава и адсорбционных свойств клеточных стенок [30, 31] тканей кора древесных растений используется для создания компостов [32], субстратов для фиторемедиации загрязненных территорий [33], выращивания грибов [34] и растений [35].

Углеродсодержащие осадочные породы в Карелии впервые были описаны Н.Я. Озерецковским в XVIII в. как углистые сланцы. В XIX в., после выхода в свет работ А.А. Иностранцева, эти породы получили название «шунгиты», ставшее в наши дни довольно известным. А.А. Иностранцев описал четыре разновидности углеродсодержащих пород, одну из которых, обнаруженную им в районе д. Шуньга, предложил называть шунгитом. Позднее это название стали применять ко всем углеродсодержащим породам, обнаруженным в Карелии [11]. Считается, что шунгит является специфической формой углерода, представляющей собой некристаллический, неграфитируемый, фуллереноподобный углерод,

отличающийся от графитового на уровне надмолекулярной, атомной ионной структуры [36]. Элементный состав шунгитовых пород весьма разнообразен и зависит от месторождения [37]. Основу минерального вещества шунгитовых пород Зажогинского месторождения составляют мг/кг: Na (7038), Mg (6039), Al (37861), K (13628), Ca (4436), Ti (1412), Fe (40225), Cu (110), As (96), Ba (250), V (127), Mn (128), Zn (76), Zr (41), Pb(41), Cr (68), Se (17), Rb (30), Sr (37), Mo (12), Ce (10), Nd (9), Co(4), Ga (4), Br (2), Y (11), La (6), Sm (1), Gd (1), Dy (1), U (6), Th (4), Yb (0,8), Er (0,8) [8]. При добавлении коры и шунгита в концентрациях 10 г/кг в субстрат выращивания растений овса посевного, исходные грунты многократно обогатились всеми исследуемыми металлами (см. табл. 2). Можно отметить загрязнение (ПДК выше нормы) исходных грунтов Cu, Zn и Ni.

Растения овса посевного выращивались до фазы цветения, и анализ ростовой активности показал на начальных этапах онтогенеза растений стимулирующий эффект добавок из коры и шунгита во всех вариантах эксперимента. Особенно этот эффект проявился в первые дни выращивания овса. При этом шунгитовые добавки эффективнее

стимулировали рост растений. Можно предположить радиационное стимулирующее влияние на рост растений овса, так как шунгитовые породы характеризуются невысоким радиационным фоном. Далее, после 40 сут. выращивания (фаза кущения), рост растений замедлился и достоверно оставался повышенным в конце эксперимента только в варианте с корой и шунгитом УГ+К+Ш (см. рис. 1). Длина корней растений в конце эксперимента была достоверно повышенной на 20 % при выращивании на субстрате с добавлением коры (УГ+К).

Содержание общего хлорофилла достоверно не зависело от условия выращивания растений и было на уровне 35...40 отн. ед. В конце выращивания содержание фотосинтетических пигментов листа растений также не изменялось при внесении добавок из коры и шунгита и было типичным для овса посевного (см. рис. 1). Это свидетельствует об оптимальном функционировании фотосинтетического аппарата растений в течение всего цикла выращивания. Известно влияние шунгитовой крошки на физиологические процессы растений лука репчатого (*Allium cepa* L.). При концентрациях шунгита в почве 20 г/кг установлено снижение содержания пигментов и уменьшение величины потенциального квантового выхода фотохимической активности фотосистемы II при незначительном увеличении скорости фотосинтеза. Также показано увеличение у растений лука эффективности использования воды на фотосинтез (ЭИВ) при концентрации шунгита 10 г/кг почвы [15].

При выращивании овса на субстратах с корой и шунгитом практически во всех вариантах содержание элементов в растениях увеличивалось, по сравнению с контрольным образцом (см. рис. 3). При этом количество Zn, Cu и Mn было оптимальным, а содержание Fe и Al у растений приближалось к критическому уровню. Содержание Fe в растениях в варианте с корой и шунгитом (УГ+К+Ш) в конечных грунтах достоверно снизилось (на 40 %) относительно варианта только с шунгитом (УГ+Ш). Возможно, кора ограничивала поступление Fe в растения. Металлы Fe, Al преимущественно (83...85 %) депонировались в корнях овса посевного, Zn, Cu и Mg — в наземных органах растений.

Поглощение металлов характеризуется их коэффициентами поглощения. Если КБП больше 1, то он показывает во сколько раз уровень элемента больше в растении, чем в среде обитания, и наоборот, если КБП меньше 1, то содержание элемента в среде увеличено кратно коэффициенту, по сравнению с растением. То есть это динамический показатель, который может уменьшаться при увеличении абсолютного содержания

элемента в растении (например, при условии роста содержания элемента в грунте). Нашим исследованием установлено, что КБП Fe и Al был меньше 1, однако при этом наблюдался высокий уровень содержания металлов в растениях овса. Этот коэффициент зависит от природы поглощаемого элемента (плотности, молекулярной массы), активности и наличия переносчиков металла в клетке и в тканях (ризодермы, эндодермы, ксилемы корня) растения, концентрации элемента в среде обитания растений.

Так, Fe, *d*-металл, с высокой молекулярной массой, характеризуется высоким кларком в земной коре (4,65 % по А. В. Виноградову), в нормальных условиях КБП Fe обычно меньше 1, металл слабо транспортируется из корней в наземные органы растений [38]. Критические уровни содержания Fe у растений — более 300...600 мг/кг [24] и доходит до 3000 мг/кг у растений гипераккумуляторов этого металла [39]. Fe выполняет многочисленные функции: является кофактором аденозин-5'-фосфосульфатредуктазы в ассимиляции сульфатов [40], альтернативной оксидазы в дыхании [41], кофактором ферментов системы антиоксидантной защиты — каталазы [42], пероксидазы [43], супероксиддисмутазы [44], компонентом фотосистемы II (ферредоксин) [45] входит в состав цитохромов и железосодержащих белков ферритинов, выполняющих также антиоксидантную защиту клеток [46]. Содержание Fe на территории северо-западных регионов России повышено в наземных и водных экосистемах в связи с природными особенностями и ее антропогенным загрязнением [39], поэтому привносить дополнительно Fe с шунгитовыми субстратами в среду обитания растений несколько не оправдано.

Al, *p*-металл, обладающий амфотерными свойствами с определенной (как активатор сукцинатдегидрогеназы, пектинполигалактуроназы, как транспортирующий белки через ионные каналы, как создающий потенциал плазмалеммы), но малоизученной функцией у растений [47], также, как и Fe, широко распространен в земной коре (кларк 8,05 % по Виноградову А.В.). Фитотоксичность Al проявляется на кислых почвах, поскольку при pH менее 4,5 растворимость фосфатов Al резко возрастает [25, 48]. Растения значительно отличаются по уровню содержания Al в ненарушенных условиях — от 50 до 3000 мг/кг у растений гипераккумуляторов (чай *Camelia sinensis*, гортензия *Hydrangea* sp. и гречиха *Fagopyrum esculentum*), поэтому критический уровень содержания Al для растений достоверно не установлен. Хорошо известно, что токсичность металлов в растениях проявляется на клеточном, тканевом, организменном уровнях, являясь причиной различных нарушений физиологических процессов,

роста и развития растений [49]. Фитотоксическое действие Al^{3+} в присутствии Fe^{3+} уменьшается, поскольку Fe^{3+} , возможно, индуцируют синтез белков, подобных трансферрину и лактоферрину у животных; органических кислот и фитохелатинов, связывающих Al^{3+} , в клетках корня ячменя [50–52]. Присутствие Fe^{3+} снижает токсическое влияние Al^{3+} на уровне метаболических реакций. В формировании устойчивости растений к токсическому воздействию Al участвует ген толерантности *Alt*. Продуктом этого гена является белок — шаперон, который переносит органические кислоты в прикорневую зону, инактивируя Al^{3+} [53, 54].

Можно отметить повышенное содержание *S* (в 2 раза) — до 0,3...0,4 % в надземных органах овса посевного при выращивании на субстратах с добавлением шунгита (см. рис. 4). При этом в этих вариантах выращивания в грунтах содержание *S* также было высоким по сравнению с контрольным образцом. Среднее содержание *S* в надземной массе овса в ненарушенных условиях обитания обычно составляет 0,17...0,26 % [55]. В нашем эксперименте *S* содержалась в исходном универсальном грунте (сульфаты *Na* и *K*), в шунгитовой породе (см. табл. 1.), а также в коре древесных растений, особенно с нарушенных агрогенным загрязнением территорий, так как *S* содержится в составе SO , SO_2 — газов в выбросах целлюлозно-бумажных комбинатов региона. После химических превращений в хвое сосны обыкновенной *S* в виде сульфитов и сульфатов включается в биохимические циклы в организме дерева и может выводиться из его обмена, депонируясь в коре [56].

Количество *N*, *K* и *C* значительно увеличивалось в растениях овса при выращивании растений на коровых субстратах. Это связано с оптимизацией минерального питания растений при обогащении универсального грунта корой.

Коэффициенты биологического поглощения биофильных элементов — *Mg*, *Cu* и *Zn* были в большинстве случаев больше единицы и имели максимальное значение при поглощении *Cu* (3,00...3,87), *Zn* (4,56...6,77) в условиях грунта и коры (УГ+К). Следует обратить внимание, что при совместном использовании коры и шунгита (УГ+К+Ш), КБП всех исследуемых металлов были ниже, чем в условиях только шунгитового субстрата (УГ+Ш). Так, КБП металлов всем растением снижались следующим образом: *Fe* 0,18 => 0,13, *Al* 0,65 => 0,56, *Mg* 2,44 => 1,66, *Cu* 1,05 => 0,62, *Zn* 1,99 => 1,29 (см. табл. 3). Можно сделать вывод, что при совместном использовании коры и шунгита в субстратах кора снижает поглощение металлов корнями растений овса из шунгитовой породы. Возможно, это свя-

зано с тем, что кора выступает ионообменником металлов, связывая их за счет химических функциональных групп вторичной клеточной стенки коры, в составе лигнина, фенолов, суберина, восков. Такой механизм депонирования металлов клеточной стенкой растительных тканей хорошо известен [30, 31]. Именно за счет этого корового влияния (ограничения поступления металлов в растения) ростовые показатели овса оставались повышенными в конце эксперимента в варианте с корой и шунгитом (УГ+К+Ш) (см. рис. 1).

Выводы

Установлено, что шунгитовые добавки на начальных этапах онтогенеза растений эффективнее стимулируют рост, чем коровые, а кора и шунгит в грунтах не влияют на фотосинтетическую функцию овса; грунты обогащались макро- и микроэлементами до оптимальных (*Fe*, *Mg*, *Mn*) и загрязняющих концентраций (*Cu*, *Zn*, *Ni*, *S*) при внесении шунгита отдельно и совместно с корой; кора снижает поглощение металлов корнями растений овса из шунгитовой породы при совместном использовании коры и шунгита в субстратах. При этом выявлено накопление растениями *Zn*, *Cu* и *Mn* до нормальных, а *Fe*, *Al* и *S* — до критических уровней содержания.

Результаты исследования свидетельствуют, что кору сосны обыкновенной можно безопасно и с положительным эффектом оптимизации минерального питания растений применять в агротехнологиях. Использование же шунгита для выращивания растений требует осторожного подхода, с учетом его концентрации, времени использования, фазы онтогенеза растений, с контролем содержания элементов в корнях и надземных органах.

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

Список литературы

- [1] ЛесПромИнформ. URL: <https://lesprominform.ru/news.html?id=20040> (дата обращения 09.03.2023).
- [2] Сеницын Н.Н., Телин Н.В., Грызлов В.С., Андреев А.С., Виноградова М.С., Гаркавченко Э.В., Гневашева В.П., Кузнецова В.П., Павлова А.И. Моделирование динамики выхода влаги и летучих веществ в процессе нагрева древесной биомассы (коры) // Вестник Череповецкого государственного университета, 2018. № 2 (83). С. 47–53.
- [3] Гришкова Л.Л. Использование древесной коры в качестве удобрений. М.: Изд-во ВНИПИЭИлеспром, 1982. № 10. С. 11–25.
- [4] Девятловская А.Н. Использование древесной коры в качестве тепличного грунта // Вестник КрасГАУ, 2010. № 2. С. 25–27.

- [5] Лоскутов С.Р., Семенович А.В., Анискина А.А. Продукты технического назначения из коры хвойных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 114 с.
- [6] Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. Состояние и перспективы использования древесной коры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [7] Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // Resources and Technology, 2015. Т. 12. № 1. С. 11–18.
- [8] Платонов В.В., Прокопченков Д.В., Проскуряков В.А., Сычев А.И., Честнова Т.В., Швыкин А.Ю. Химический состав минерального вещества шунгитовой породы Зажогинского месторождения Карельского Заонезья // Вестник новых медицинских технологий, 2006. Т. XIII. № 4. С. 132–135.
- [9] Дубровина И.А. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2018. № 41. С. 27–41.
- [10] Панасюгин А.С., Цыганов А.Р., Григорьев С.В., Чипурко З.Н., Гузова Л.М. Оценка возможности использования шунгита Зажогинского месторождения в металлургии // Литье и металлургия, 2013. № 3. С. 33–35.
- [11] Кондрашова Н.И., Медведев П.В. Влияние микроэлементного состава углеродсодержащих пород на возможность их использования в водоочистке (на примере шунгитов из Онежской палеопротерозойской структуры Карелии) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. Т. 332. № 9. С. 43–53.
- [12] Мизин В.Г., Страхов В.М. Промышленный опыт использования шунгитовых пород в производстве ферросплавов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации, 2009. № 10 (1318). С. 78–84.
- [13] Ковалевский В.В. Шунгитовый углерод — структурные особенности и приложение к технологическим процессам // Шунгитовые породы Карелии: геология, строение, инновационные материалы и технологии «Шунгит — 2020 — 2021»: материалы конференции с международным участием. Петрозаводск, 29 июня — 1 июля 2021 г. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2021. С. 29–33.
- [14] Тойкка М.А., Кекконен А.П. Шунгит как удобрение // Ученые записки Карело-Финского государственного университета, 1946. Т. 1. С. 214–268.
- [15] Ikkonen E., Chazhengina S., Butilkina M., Sidorova V. Physiological response of onion (*Allium cepa* L.) seedlings to shungite application under two soil water regimes // Acta Physiologiae Plantarum, 2021, pp. 43–76. DOI: 10.1007/s11738-021-03239-9
- [16] Тимейко Л.В., Кузнецова Л.А., Голубева О.А. К вопросу использования шунгитов в сельскохозяйственном производстве // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования: Сб. материалов науч. конф., посвященной 80-летию кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами в 100-летней истории Воронежского государственного университета, Воронеж, 15–19 мая 2017 года. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2017. С. 233–237.
- [17] Теребова Е.Н. Азотные и фосфорные соединения хвойных растений при аэротехногенном загрязнении в условиях Северо-Запада России: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2002. 26 с.
- [18] Щербенко Т.А., Копчик Г.Н., Гроненберг Б.-Я., Лукина Н.В., Ливанцова С.Ю. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение, 2008. № 2. С. 9–16.
- [19] Дейнес Ю.Е., Ковалевский В.В., Первунина А.В., Ромашкин А.Е., Рычанчик Д.В., Иешко Е.П. Шунгитовые породы Карелии: от геологических исследований к перспективам использования в инновационных технологиях // Труды КарНЦ РАН. Комплексные научные исследования КарНЦ РАН, 2021. № 7. С. 72–88.
- [20] Чаженгина С.Ю., Рожкова В.С., Кочнева И.В. Моделирование процессов абиогенного выветривания углеродистого вещества палеопротерозойских шунгитовых пород Онежской структуры (Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН, 2019. № 2. С. 67–79.
- [21] Пономарев А.П., Подолец А.А., Макина О.А. Использование водного экстракта минерала шунгита для удаления из воды бактериальной микрофлоры // Водоснабжение и санитарная техника, 2017. № 9. С. 17–24.
- [22] Марковская Е.Ф., Теребова Е.Н., Андросова В.И., Галибина Н.А., Никерова К.М., Морозова К.В., Гуляева Е.Н., Шибаева Т.Г., Новичонок Е.В. Физиолого-биохимические методы исследования растений и лишайников // Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. URL: <https://elibrary.petsu.ru/book.shtml?id=29557> (дата обращения 08.03.2023).
- [23] Воробьева Л.А., Лопухина О.В., Салпагарова И.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: Геос, 2006. 400 с.
- [24] Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 548 p. DOI:10.1016/j.sajb.2012.03.008
- [25] Широких И.Г., Ашихмина Т.Я. Повышение толерантности растений к алюминию на кислых почвах методами биотехнологии (обзор) // Теоретическая и прикладная экология, 2016. № 2. С. 12–19.
- [26] Шукин В.М., Северинова Е.Ю., Кузьмина Н.Е., Яшкир В.А. Определение содержания алюминия в цветках ромашки аптечной методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения, 2016. № 3. С. 49–52.
- [27] Коренская И.М., Беляева А.А., Колосова О.А., Трофимова Т.Г., Измалкова И.Е., Сливкин А.И. Изучение анатомо-диагностических признаков и элементного состава листьев амаранта печального, культивируемого в Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2020. Т. 3. С. 37–44.
- [28] Жуйков Д.В. Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // Достижения науки и техники АПК, 2020. Т. 34. № 11. С. 32–42.
- [29] Храменкова О.М., Новиков Р.И. Минеральный состав коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) различных типов леса // Бюллетень науки и практики, 2016. № 9. С. 31–35.
- [30] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Ion-exchange properties and swelling capacity of leaf cell wall of Arctic plants // Czech Polar Reports, Brno, 2018, v. 8, no. 1, pp. 132–142. DOI: 10.5817/CPR2018-1-10
- [31] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. 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(2), pp. 169–188.

- [32] Климова Е.В. Использование древесной коры и цеолитов при выращивании декоративных культур (выращивание на искусственных почвогрунтах в защищенном грунте) // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал, 2003. № 3. С. 606.
- [33] Борматенков А.М., Графова Е.О., Зайцева М.И., Стюнев В.С. Использование смеси осадков сточных вод и отходов лесоперерабатывающего производства как почвенной субстрата для рекультивации нарушенных земель // Resources and Technology, 2020. Т. 17. № 2. С. 97–113.
- [34] Бондарь П.Н. Использование отходов деревообрабатывающей промышленности для создания биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma* // Хвойные бореальной зоны, 2015. Т. 33, № 5–6. С. 286–290.
- [35] Ульянова О.А. Использование древесной коры и цеолитов при выращивании декоративных культур // Агрехимия, 2002. № 7. С. 47–55.
- [36] Ковалевский В.В. Шунгит или высший антраксолит? // Записки Российской минералогического общества, 2009. Т. 138. № 5. С. 97.
- [37] Прокопченко Д.В., Платонов В.В., Проскуряков В.А., Сычев А.И., Честнова Т.В., Швыкин А.Ю. Химический состав минерального вещества шунгитовой породы Зажогинского месторождения Карельского Заонежья // Вестник новых медицинских технологий, 2006. Т. XIII. № 4. С. 132–133.
- [38] Terebova E. N., Markovskaya E. F., Androsova V. I., Galibina N. A., Kaipainen E. Potential for *Salix schwerinii* E. Wolf to uptake heavy metals in the contaminated territories of mining industry in the north-west Russia // Siberian Journal of Forest Science, 2017, v. 1, pp. 74–86. DOI: 10.15372/SJFS20170108
- [39] Теребова Е.Н., Павлова М.А., Орешникова Н.В. Аккумуляция железа растениями галофитами на литорали Белого моря // Известия РАН. Серия Биологическая, 2023. № 3. С. 413–425.
- [40] Kopriva S., Mugford S.G., Matthewman C., Koprivova A. Plant sulfate assimilation genes: redundancy versus specialization // Plant Cell Rep., 2009, v. 28(12), pp. 1769–1780. DOI: 10.1007/s00299-009-0793-0
- [41] Albury M.S., Affourtit C., Crichton P.G, Moore A.L. Structure of the plant alternative oxidase: Site-Directed mutagenesis provides new information on the active site and membrane topology // J. of Biological Chemistry, 2002, v. 277(2), pp. 1190–1194. DOI: 10.1074/jbc.M109853200
- [42] Grigoras A.G. Catalase immobilization – A review // Biochemical Engineering Journal, 2017, v. 117 (B), pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.bej.2016.10.021
- [43] Rizhsky L., Liang. H., Mittler R. The Water–Water Cycle Is Essential for Chloroplast Protection in the Absence of Stress // The J. of Biological Chemistry, 2003, v. 278, no. 40, pp. 38921–38926. DOI: 10.1074/jbc.M304987200
- [44] McKersie B.D., Murnaghan J., Jones K.S., Bowley S.R. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance // Plant Physiol., 2000, v. 122(4), pp. 1427–1437. DOI: 10.1104/pp.122.4.1427
- [45] Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants // Planta, 2003, v. 216(4), pp. 541–551. DOI: 10.1007/s00425-002-0920-4
- [46] Briat J.F., Duc C., Ravet K., Gaymard F. Ferritins and iron storage in plants // Biochim Biophys Acta, 2010, v. 1800(8), pp. 806–814. DOI: 10.1016/j.bbagen.2009.12.003
- [47] Яковлева О.В. Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2018. № 179 (3). С. 315–331.
- [48] Bose J., Babourina O., Shabala S., Rengel Z. Low-pH and aluminium resistance in *Arabidopsis* correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots // Plant Cell Physiol, 2013, v. 54, pp. 1093–1104. DOI: 10.1093/pcp/pct064
- [49] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Pavlova M.A. Ecological and physiological features of metal accumulation of halophytic plants on the White Sea coast. Handbook of bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions / Eds. M. Hasanuzzaman, M. Narasimha V. Prasad. Academic Press, 2020, pp. 295–327. DOI:10.1016/b978-0-12-819382-2.00019-3
- [50] Амосова Н.В., Сынзыныс Б.И. О комбинированном действии алюминия и железа на проростки ячменя и пшеницы // Сельскохозяйственная биология, 2005. № 1. С. 46–49.
- [51] Амосова Н.В., Сынзыныс Б.И., Ульяненко Л.Н. Чувствительность различных сортов ячменя к действию алюминия и железа // Наука сельскохозяйственного производства и образования, 2004. С. 6–8.
- [52] Bose J., Babourina O., Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants // J. Exp. Bot., 2011, v. 62, pp. 2251–2264. DOI: 10.1093/jxb/erq456
- [53] Moshtaghie A.A., Skillen A.W. Binding of aluminum to transferrin and lactoferrin // Biochem Soc. Trans., 1986, no. 14, pp. 916–917.
- [54] Verkieij J.A.C., Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants // Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects / Ed. A.J. Shaw. N.Y., 1990, pp. 179–193.
- [55] Аристархов А.Н. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международный сельскохозяйственный журнал, 2016. № 5. С. 39–47.
- [56] Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. Ч.1. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 1996. 213 с.
- [57] СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Официальный интернет-портал правовой информации. 2021. 998 с.

Сведения об авторах

Теребова Елена Николаевна — канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», eterebova@gmail.com

Орешникова Наталия Владимировна — канд. биол. наук, доцент факультета почвоведения, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ogreshinka@list.ru

Павлова Мария Андреевна — аспирант кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», mariya-leta@yandex.ru

Стародубцева Анастасия Андреевна — канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», korzunina84@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2023.

Одобрено после рецензирования 21.06.2023.

Принята к публикации 01.12.2023.

APPLICATION OF SCOTS PINE BARK AND SHUNGITE CHIPS FOR GROWING OATS (*AVENA SATIVA* L.) IN PROTECTED GROUND

E.N. Terebova^{1✉}, N.V. Oreshnikova², M.A. Pavlova¹, A.A. Starodubtseva¹

¹Petrozavodsk State University, 33, Lenina st., 185910, Petrozavodsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, named after M.V. Lomonosov, 1, Leninskiye Gory st., 119991, Moscow, Russia

eterebova@gmail.com

The study results on the possible application of Scots pine bark (*Pinus sylvestris* L.) and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in a laboratory experiment for 70 days are presented. Growth parameters, the content of photosynthetic leaf pigments (chlorophylls A, B, carotenoids), the content of macroelements (C, N, P, K, S, Fe, Mg) and microelements (Al, Zn, Cu) were analyzed, and the coefficients of biological absorption of metals by roots, aboveground organs and the entire oat plant were calculated. The experiments were carried out to enrich soils with macro- and microelements to optimal (Fe, Mg, Mn) and contaminant levels (Cu, Zn, Ni, S), by adding shungite to universal soil (control sample) in concentrations of 10 g/kg separately and together with pine bark. Stimulation of growth processes in oat plants with their subsequent slowdown at the end of the experiment is shown when using both bark and shungite in substrates. It was found that shungite additives at the initial stages of plant ontogenesis stimulated growth more effectively than bark additives, and bark and shungite in soils did not affect the photosynthetic function of oats. It was revealed that plants, growing on substrates with bark and shungite, accumulated Zn, Cu and Mn to normal levels, while Fe, Al and S to critical levels. It was concluded that Scots pine bark can be safely used in agricultural technologies with a positive effect of optimizing the mineral nutrition of plants.

Keywords: bark, Scots pine, shungite, oats, macro- and microelements, biological absorption coefficients

Suggested citation: Terebova E.N., Oreshnikova N.V., Pavlova M.A., Starodubtseva A.A. *Ispol'zovanie kory sosny obyknovnoy i shungitovoy kroshki dlya vyrashchivaniya ovsa posevnogo (Avena sativa L.) v zakrytom grunte* [Application of Scots pine bark and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in protected ground]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 55–69. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

References

- [1] LesPromInform [LesPromInform]. Available at: <https://lesprominform.ru/news.html?id=20040> (accessed 03.09.2023).
- [2] Sinitsyn N.N., Telin N.V., Gryzlov V.S., Andreev A.S., Vinogradova M.S., Garkavchenko E.V., Gnevasheva V.P., Kuznetsova V.P., Pavlova A.I. *Modelirovanie dinamiki vykhoda vlagi i letuchikh veshchestv v protsesse nagreva drevesnoy biomassy (kory)* [Modeling the dynamics of the release of moisture and volatile substances during the heating of woody biomass (bark)]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2018, no. 2 (83), pp. 47–53.
- [3] Grishkova L.L. *Ispol'zovanie drevesnoy kory v kachestve udobreniy* [Use of tree bark as fertilizer]. Moscow: VNIPIEIllesprom, 1982, no. 10, pp. 11–25.
- [4] Devyatlovskaya A.N. *Ispol'zovanie drevesnoy kory v kachestve teplichnogo grunta* [The use of tree bark as a greenhouse soil]. *Vestnik KrasGAU* [KrasSAU Bulletin], 2010, no. 2, pp. 25–27.
- [5] Loskutov S.R., Semenovich A.V., Aniskina A.A. *Produkty tekhnicheskogo naznacheniya iz kory khvoynykh porod* [Technical products from the bark of coniferous species]. Novosibirsk: Publishing house of SO RAS, 2010, 114 p.
- [6] Pásztor Z., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Mohácsiné I.R., Börsök Z. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya drevesnoy kory* [State and prospects of tree bark use]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88

- [7] Robonen E.V., Zaytseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasil'ev S.B. *Opyt razrabotki i ispol'zovaniya konteynernykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Alternatives to peat*. Resources and Technology, 2015, v. 12, no. 1, pp. 11–18. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [8] Platonov V.V., Prokopchenkov D.V., Proskuryakov V.A., Sychev A.I., Chestnova T.V., Shvykin A.Yu. *Khimicheskiy sostav mineral'nogo veshchestva shungitovoy porody Zazhoginskogo mestorozhdeniya Karel'skogo Zaonezh'ya* [The chemical composition of the mineral substance of the shungite rock of the Zazhoginsky deposit of the Karelian Zaonezhye]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Bulletin of New Medical Technologies], 2006, v. XIII, no. 4, pp. 132–135.
- [9] Dubrovina I.A. *Izmenenie soderzhaniya obshchego ugleroda, azota i fosfora v pochvakh taezhnoy zony Respubliki Kareliya pri sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii* [Changes in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in soils of the taiga zone of the Republic of Karelia during agricultural use]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biology [Bulletin of the Tomsk State University. Biology], 2018, no. 41, pp. 27–41. DOI: 10.17223/19988591/41/2
- [10] Panasyugin A.S., Tsyganov A.R., Grigor'ev S.V., Chipurko Z.N., Guzova L.M. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya shungita Zazhoginskogo mestorozhdeniya v metallurgii* [Evaluation of the possibility of using shungite from the Zazhoginsky deposit in metallurgy]. Lit'e i metallurgiya [Casting and metallurgy], 2013, no. 3, pp. 33–35.
- [11] Kondrashova N.I., Medvedev P.V. *Vliyanie mikroelementnogo sostava uglirodosoderzhashchikh porod na vozmozhnost' ikh ispol'zovaniya v vodoочистке (na primere shungitov iz Onezhskoy paleoproterozoyskoy struktury Karelii)* [Influence of microelement composition of carbonaceous rocks on the possibility of their use in water purification (on the example of shungites from the Onega Paleoproterozoic structure of Karelia)]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2021, v. 332, no. 9, pp. 43–53. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3352
- [12] Mizin V.G., Strakhov V.M. *Promyshlennyy opyt ispol'zovaniya shungitovykh porod v proizvodstve ferrosplavov* [Industrial experience of using shungite rocks in the production of ferroalloys]. Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2009, no. 10(1318), pp. 78–84.
- [13] Kovalevskiy V.V. *Shungitovyy uglerod — strukturnye osobennosti i prilozhenie k tekhnologicheskim protsessam* [Shungite carbon — structural features and application to technological processes]. Shungitovye porody Karelii: geologiya, stroenie, innovatsionnye materialy i tekhnologii «Shungit — 2020 — 2021: materialy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Shungite rocks of Karelia: geology, structure, innovative materials and technologies «Shungite — 2020 — 2021»: materials of the conference with international participation]. Petrozavodsk, June 29 — July 1, 2021. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2021, pp. 29–33.
- [14] Toikka M.A., Kekkonen A.P. *Shungit kak udobrenie* [Shungite as a fertilizer]. Uchenye zapiski Karelo-finskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific notes of the Karelian-Finnish State University], 1946, v. 1, pp. 214–268.
- [15] Ikkonen E., Chazhengina S., Butilkina M., Sidorova V. *Physiological response of onion (*Allium cepa* L.) seedlings to shungite application under two soil water regimes*. Acta Physiologiae Plantarum, 2021, pp. 43–76. DOI: 10.1007/s11738-021-03239-9
- [16] Timeyko L.V., Kuznetsova L.A., Golubeva O.A. *K voprosu ispol'zovaniya shungitov v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve* [On the issue of using shungites in agricultural production]. Chernozemy Tsentral'noy Rossii: genesis, evolyutsiya i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya: sbornik materialov nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu kafedry pochvovedeniya i upravleniya zemel'nymi resursami v 100-letney istorii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta [Chernozems of Central Russia: genesis, evolution and problems of rational use: collection of materials of a scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Soil Science and Land Management in the 100-year history of Voronezh State University], Voronezh, 15–19 May 2017. Voronezh: Voronezh State University, 2017, pp. 233–237.
- [17] Terebova E.N. *Azotnye i fosfornye soedineniya khvoynykh rasteniy pri aerotekhnogennom zagryaznenii v usloviyakh Severo-Zapada Rossii* [Nitrogen and phosphorus compounds of coniferous plants under aerotechnogenic pollution in the conditions of the North-West of Russia]. Abs. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Petrozavodsk, 2002, 26 p.
- [18] Shcherbenko T.A., Koptsik G.N., Gronenberg B.-Ya., Lukina N.V., Livantsova S.Yu. *Pogloshchenie elementov pitaniya i tyazhelykh metallov sosnoy v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya* [Absorption of batteries and heavy metals by pine under conditions of atmospheric pollution]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie [Bulletin of Moscow University. Ser. 17. Soil science], 2008, no. 2, pp. 9–16.
- [19] Deynes Yu.E., Kovalevskiy V.V., Pervunina A.V., Romashkin A.E., Rychanchik D.V., Ieshko E.P. *Shungitovye porody Karelii: ot geologicheskikh issledovaniy k perspektivam ispol'zovaniya v innovatsionnykh tekhnologiyakh* [Shungite rocks of Karelia: from geological research to prospects for use in innovative technologies]. Trudy KarNC RAN. № 7. Kompleksnye nauchnye issledovaniya KarNC RAN [Transactions of Karelian Research Center of Russian Academy of Sciences]. Complex scientific researches of KarRC RAS, 2021, no. 7, pp. 72–88. DOI: 10.17076/them1426
- [20] Chazhengina S.Yu., Rozhkova V.S., Kochneva I.V. *Modelirovanie protsessov abiogennoy vyvetrivaniya uglerodistogo veshchestva paleoproterozoyskikh shungitovykh porod Onezhskoy struktury (Kareliya)* [Modeling of processes of abiogenic weathering of carbonaceous matter of Paleoproterozoic shungite rocks of the Onega structure (Karelia)]. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, no. 2, pp. 67–79. DOI: 10.17076/geo827
- [21] Ponomarev A.P., Podolets A.A., Makina O.A. *Ispol'zovanie vodnogo ekstrakta minerala shungita dlya udaleniya iz vody bakterial'noy mikroflory* [The use of an aqueous extract of the mineral shungite to remove bacterial microflora from water]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Engineering], 2017, no. 9, pp. 17–24.
- [22] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Galibina N.A., Nikerova K.M., Morozova K.V., Gulyaeva E.N., Shibaeva T.G., Novichonok E.V. *Fiziologo-biokhimicheskie metody issledovaniya rasteniy i lishaynikov* [Physiological and biochemical methods for the study of plants and lichens]. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House. 2018. Available at: <https://elibrary.petrSU.ru/book.shtml?id=29557> (accessed 08.03.2023).
- [23] Vorob'eva L.A., Lopukhina O. V., Salpagarova I. A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Moscow: Geos, 2006, 400 p.

- [24] Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 548 p. DOI: 10.1016/j.sajb.2012.03.008
- [25] Shirokikh I.G., Ashikhmina T.Ya. *Povyshenie tolerantnosti rasteniy k alyuminiyu na kislykh pochvakh metodami biotekhnologii (obzor)* [Increasing plant tolerance to aluminum on acidic soils using biotechnology methods (review)]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and applied ecology], 2016, no. 2, pp. 12–19.
- [26] Shchukin V.M., Severinova E.Yu., Kuz'mina N.E., Yashkir V.A. *Opreделение soderzhaniya alyuminiya v tsvetkakh romashki aptechnoy metodom atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy* [Determination of aluminum content in chamomile flowers by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry]. Vedomosti Nauchnogo centra ekspertizy sredstv medicinskogo primeneniya [Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical Applications], 2016, no. 3, pp. 49–52.
- [27] Korenskaya I.M., Belyaeva A.A., Kolosova O.A., Trofimova T.G., Izmalkova I.E., Slivkin A.I. *Izuchenie anatomo-diagnosticheskikh priznakov i elementnogo sostava list'ev amaranta pechal'nogo, kul'tiviruemogo v Voronezhskoy oblasti* [Study of anatomical and diagnostic features and elemental composition of sad amaranth leaves cultivated in the Voronezh region]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya [Bulletin of the Voronezh State University]. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy, 2020, v. 3, pp. 37–44.
- [28] Zhuykov D.V. *Sera i mikroelementy v agrotsenozakh (obzor)* [Sulfur and microelements in agrocenoses (review)]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex], 2020, v. 34, no. 11, pp. 32–42. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105
- [29] Khrumchenkova O.M., Novikov R.I. *Mineral'nyy sostav kory sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) razlichnykh tipov lesa* [Mineral composition of the bark of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) of different forest types]. Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and Practice], 2016, no. 9, pp. 31–35. DOI: 10.5281/zenodo.154207
- [30] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Ion-exchange properties and swelling capacity of leaf cell wall of Arctic plants. Czech Polar Reports, Brno, 2018, v. 8, no. 1, pp. 132–142. DOI: 10.5817/CPR2018-1-10
- [31] Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. 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(2), pp. 169–188.
- [32] Klimova E.V. *Ispol'zovanie drevesnoy kory i tseolitov pri vyrashchivanii dekorativnykh kul'tur (vyrashchivanie na iskusstvennykh pochvogruntakh v zashchishchennom grunte)*. [The use of tree bark and zeolites in the cultivation of ornamental crops (cultivation on artificial soils in protected ground)]. Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal [Ecological safety in the agro-industrial complex. Abstract journal], no. 3, 2003, p. 606.
- [33] Bormatenkov A.M., Grafova E.O., Zaytseva M.I., Syuney V.S. *Ispol'zovanie smesi osadkov stochnykh vod i otkhodov lesopererabatyvayushchego proizvodstva kak pochvennogo substrata dlya rekul'tivatsii narushennykh zemel'* [The use of a mixture of sewage sludge and timber processing waste as a soil substrate for the reclamation of disturbed lands]. Resources and Technology, 2020, v. 17, no. 2, pp. 97–113.
- [34] Bondar' P.N. *Ispol'zovanie otkhodov derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti dlya sozdaniya biopreparatov na osnove gribov roda Trichoderma* [Use of woodworking industry waste to create biopreparations based on fungi of the genus *Trichoderma*]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2015, v. 33, no. 5–6, pp. 286–290.
- [35] Ul'yanova O.A. *Ispol'zovanie drevesnoy kory i tseolitov pri vyrashchivanii dekorativnykh kul'tur* [The use of wood bark and zeolites in the cultivation of ornamental crops]. Agrohimiya [Agrochemistry], 2002, no. 7, pp. 47–55.
- [36] Kovalevskiy V.V. *Shungit ili vysshiy antraksolit?* [Shungite or higher anthraxolite?]. Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society], 2009, v. 138, no. 5, p. 97.
- [37] Prokopchenkov D.V., Platonov V.V., Proskuryakov V.A., Sychev A.I., Chestnova T.V., Shvykin A.Yu. *Khimicheskii sostav mineral'nogo veshchestva shungitovoy porody Zazhoginskogo mestorozhdeniya Karel'skogo Zaonezh'ya* [The chemical composition of the mineral substance of the shungite rock of the Zazhoginsky deposit of the Karelian Zaonezh'ye]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Bulletin of new medical technologies], 2006, v. XIII, no. 4, pp. 132–133.
- [38] Terebova E. N., Markovskaya E. F., Androsova V. I., Galibina N. A., Kaipainen E. Potential for *Salix schwerinii* E. Wolf to uptake heavy metals in the contaminated territories of mining industry in the north-west Russia. Siberian Journal of Forest Science, 2017, v. 1, pp. 74–86. DOI: 10.15372/SJFS20170108
- [39] Terebova E.N., Pavlova M.A., Oreshnikova N.V. *Akkumulatsiya zheleza rasteniyami galofitami na litorali Belogo morya* [Accumulation of iron by halophyte plants in the littoral of the White Sea]. Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya [Biology Bulletin], 2023, no. 3, pp. 10–18.
- [40] Kopriva S., Mugford S.G., Matthewman C., Koprivova A. Plant sulfate assimilation genes: redundancy versus specialization. Plant Cell Rep., 2009, v. 28(12), pp. 1769–1780. DOI: 10.1007/s00299-009-0793-0
- [41] Albury M.S., Affourtit C., Crichton P.G, Moore A.L. Structure of the plant alternative oxidase: Site-Directed mutagenesis provides new information on the active site and membrane topology. J. of Biological Chemistry, 2002, v. 277(2), pp. 1190–1194. DOI: 10.1074/jbc.M109853200
- [42] Grigoros A.G. Catalase immobilization – A review. Biochemical Engineering Journal, 2017, v. 117 (B), pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.bej.2016.10.021
- [43] Rizhsky L., Liang, H., Mittler R. The Water–Water Cycle Is Essential for Chloroplast Protection in the Absence of Stress. The J. of Biological Chemistry, 2003, v. 278, no. 40, pp. 38921–38926. DOI: 10.1074/jbc.M304987200
- [44] McKersie B.D., Murnaghan J., Jones K.S., Bowley S.R. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance. Plant Physiol., 2000, v. 122(4), pp. 1427–1437. DOI: 10.1104/pp.122.4.1427
- [45] Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. Planta, 2003, v. 216(4), pp. 541–551. DOI: 10.1007/s00425-002-0920-4
- [46] Briat J.F., Duc C., Ravet K., Gaymard F. Ferritins and iron storage in plants. Biochim Biophys Acta, 2010, v. 1800(8), pp. 806–814. DOI: 10.1016/j.bbagen.2009.12.003

- [47] Yakovleva O.V. *Fitotoksichnost' ionov alyuminiya* [Phytotoxicity of aluminum ions]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [Works on applied botany, genetics and breeding], 2018, no. 179 (3), pp. 315–331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331
- [48] Bose J., Babourina O., Shabala S., Rengel Z. Low-pH and aluminium resistance in Arabidopsis correlates with high cytosolic magnesium content and increased magnesium uptake by plant roots. *Plant Cell Physiol*, 2013, v. 54, pp. 1093–1104. DOI: 10.1093/pcp/pct064
- [49] Markovskaya E.F., Terebova E.N., Androsova V.I., Pavlova M.A. Ecological and physiological features of metal accumulation of halophytic plants on the White Sea coast. *Handbook of bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions*. Eds. M. Hasanuzzaman, M. Narasimha V. Prasad. Academic Press, 2020, pp. 295–327. DOI:10.1016/b978-0-12-819382-2.00019-3
- [50] Amosova N.V., Synzynyns B.I. *O kombinirovannom deystvii alyuminiya i zheleza na prorostki yachmenya i pshenitsy* [On the combined effect of aluminum and iron on barley and wheat seedlings]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2005, no. 1, pp. 46–49.
- [51] Amosova N.V., Synzynyns B.I., Ul'yanenko L.N. *Chuvstvitel'nost' razlichnykh sortov yachmenya k deystviyu alyuminiya i zheleza* [Sensitivity of different varieties of barley to the effects of aluminum and iron]. *Nauka sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva i obrazovaniya* [Science of agricultural production and education], 2004, pp. 6–8.
- [52] Bose J., Babourina O., Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. *J. Exp. Bot.*, 2011, v. 62, pp. 2251–2264. DOI: 10.1093/jxb/erq456
- [53] Moshtaghie A.A., Skillen A.W. Binding of aluminum to transferrin and lactoferrin. *Biochem Soc. Trans.*, 1986, no. 14, pp. 916–917.
- [54] Verkieij J.A.C., Schat H. Mechanisms of metal tolerance in higher plants. *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects*. Ed. A.J. Shaw. N.Y., 1990, pp. 179–193.
- [55] Aristarkhov A.N. *Sera v agroekosistemakh Rossii: monitoring sodержaniya v pochvakh i effektivnost' ee primeneniya* [Sulfur in the agroecosystems of Russia: monitoring the content in soils and the effectiveness of its application]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], 2016, no. 5, pp. 39–47.
- [56] Lukina N.V., Nikonov V.V. *Biogekhimicheskie tsikly v lesakh Severa v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya. V 2-kh ch. Ch.1* [Biogeochemical cycles in the forests of the North under conditions of aerotechnogenic pollution. In 2 parts. Part 1]. *Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra* [Publishing House of the Kola Science Center], 1996, 213 p.
- [57] *SanPiN 1.2.3685–21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredi obitaniya»*. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii* [Russian sanitary rules and regulations. SanPiN 1.2.3685–21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans». Official Internet portal of legal information], 2021, 998 p.

The work was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2023-128).

Authors' information

Terebova Elena Nikolaevna [✉] — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, eterebova@gmail.com

Oreshnikova Natalia Vladimirovna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, of the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, oreshinka@list.ru

Pavlova Maria Andreevna — pg. of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, mariya-leta@yandex.ru

Starodubtseva Anastasia Andreevna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, PetrSU, korzunina84@mail.ru

Received 28.03.2023.

Approved after review 21.06.2023.

Accepted for publication 01.12.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest