

УДК 630\*322.43:582.475+630\*443

## ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО АЛЮМОСОДЕРЖАЩЕГО СУБСТРАТА НА РОСТ И МИКОРИЗООБРАЗОВАНИЕ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ<sup>1</sup>

© 2020 г. А. В. Егорова<sup>а</sup>, Н. П. Чернобровкина<sup>а</sup>, Е. В. Робонен<sup>а</sup>, Л. А. Савельев<sup>а</sup>,  
М. И. Зайцева<sup>б</sup>, А. Н. Терновой<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

<sup>б</sup>Петрозаводский государственный университет, пр-т. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910 Россия

<sup>с</sup>Институт геологии КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

\*E-mail: egorova@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 12.09.2018 г.

После доработки 05.03.2019 г.

Принята к публикации 05.06.2019 г.

Исследовали влияние органоминерального алюмосодержащего водопроводного осадка (ВПО) водоочистных сооружений г. Петрозаводска в качестве компонента контейнерного торфяного субстрата на рост, микоризообразование и локализацию алюминия, фосфора в эктомикоризе и органах сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Объемная доля осадка в субстрате составляла по вариантам опыта от 0 (контроль) до 100%. При дозе 60% происходило увеличение биометрических показателей сеянцев по сравнению с контролем: длина корня и масса надземной части повышались в 1.3 раза, масса корня – в 2.5 раза, отмечалось появление кораллоподобной формы микоризы. Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ показал при этой дозе ВПО значительное повышение по сравнению с контролем содержания алюминия в корнях и микоризе, фосфора – в простой форме микоризы сеянцев при снижении в органах. Интенсивный рост сеянцев этого варианта свидетельствовал об их устойчивости к высоким концентрациям алюминия в субстрате. ВПО, имеющий слабокислую реакцию, повышал pH полученных вариантов смесей до значений, оптимальных для сеянцев сосны обыкновенной. Торфяные субстраты с объемной долей осадка свыше 60% не соответствовали требованиям технологии контейнерного малообъемного выращивания по агрофизическим свойствам, что, вероятно, обуславливало понижение стимулирующего эффекта, до ингибирования.

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris*, сеянцы, микориза, водопроводный осадок водоочистных сооружений, контейнерный торфяной субстрат, алюминий, фосфор.

**DOI:** 10.31857/S0024114820010040

Производство контейнерного субстрата с оптимизированными физико-химическими характеристиками, гарантирующими нормальное развитие корневой системы и полноценное питание растений, необходимо для широкого внедрения технологии выращивания сеянцев хвойных пород с закрытой корневой системой, обеспечивающей процесс создания лесных культур качественным посадочным материалом. Активно проводится разработка и испытание альтернативных вариантов компонентов субстратов для контейнерного растениеводства (Bohne, 2004; Wright et al., 2006; Jackson, Wright, 2009; Зайцева и др., 2010; Робонен и др., 2015; Чернобровкина и др., 2016; Тебенько-

ва и др., 2017). Перспективным может оказаться использование водопроводного осадка (ВПО) водоочистных сооружений в качестве составной части субстрата при выращивании посадочного материала.

Источником хозяйственно-питьевого водоснабжения во многих регионах мира являются поверхностные воды, для очистки которых в качестве химических реагентов используют минеральные коагулянты на основе солей алюминия (Янин, 2010). Образующийся при этом коагуляционный осадок представляет собой сложную систему, основные компоненты которой – продукты взаимодействия химических реагентов в сочетании с минеральными и органическими веществами. Он и является основным видом отходов водопроводных станций (Dassanayake et al., 2015).

<sup>1</sup> Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

**Таблица 1.** Содержание химических элементов в ВПО водоочистных сооружений г. Петрозаводска

Химический состав ВПО									
доля от сухой массы, %		мг кг <sup>-1</sup> сухой массы							
C	23	K	99	Fe	20154	Mo	9.8	Pb	1.9
N	0.91	Na	191	Mn	137	Zn	6.4	Cd	0.04
P	0.026	Ca	14	Si	1994	Ni	2.9	Al	242781
S	0.308	Mg	398	Cu	6.8	Cr	5.4	Ti	1156

Масштабы образования таких отходов, отличающихся высокой влажностью и очень низкой способностью к уплотнению (обезвоживанию), достаточно велики. Применение наиболее распространенных традиционных методов утилизации ВПО (захоронение, размещение в прудах-накопителях и на площадках обезвоживания) приводит к отчуждению значительных по площади земельных территорий, на длительное время выводимых из хозяйственного использования.

ВПО является сравнительно чистым в отношении тяжелых металлов и опасных органических соединений и менее опасным для окружающей среды, чем осадок городских сточных вод (Янин, 2010). Большое внимание привлекает использование данного осадка, близкого по своим свойствам к сапропелям, в качестве органического удобрения (Янин, 2010; Dassanayakea et al., 2015; Ibrahim et al., 2015). Потенциальным отрицательным последствием от внесения ВПО в почву является токсичность алюминия и фиксация фосфора (Kim et al., 2002). При определенных значениях кислотности среды алюминий переходит в подвижные формы, что может отрицательно влиять на рост растений, и, прежде всего – рост корней (Brunner, Sperisen, 2013). Алюминий накапливается в растениях, использование которых в качестве пищи может вызывать у человека изменения в центральной нервной системе, приводить к болезни Альцгеймера и оказывать общее токсичное действие на клетки всего организма (Exley, 2012; Bhattacharjee et al., 2014).

Для предотвращения опасности попадания растительного сырья с высоким содержанием алюминия в пищевые цепи утилизация ВПО при выращивании лесов является более предпочтительной, чем в сельском хозяйстве. Показана устойчивость сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) к токсичному воздействию алюминия, обусловленная ее приспособленностью на генетическом уровне к кислым почвам бореальных лесов (Moуег-Ненгу et al., 2005). При использовании ВПО в качестве составной части контейнерного субстрата токсичность алюминия можно снижать до минимума при помощи удобрений и известкования (Dassanayakea et al., 2015). Необходимо выявление предельной доли осадка в составе субстрата, не

вызывающей токсичное для древесных пород содержание подвижных форм алюминия. Важным показателем при изучении реакции древесных растений на воздействие не биогенных элементов в повышенных концентрациях, является зольный состав органов, прежде всего ассимиляционного аппарата и тонких корней (Демаков и др., 2012). Следует учитывать, что количество и состав ВПО с различных станций водоподготовки, перерабатывающих воду разного качества по цветности, жесткости и другим показателям, может значительно отличаться по своим физико-химическим характеристикам, в т. ч. по уровню pH, обуславливая различную степень доступности алюминия для растений.

Цель работы – изучение влияния органоминерального алюмосодержащего осадка водоочистных сооружений г. Петрозаводска, используемого в качестве компонента контейнерного торфяного субстрата в различных дозах, на рост и микоризообразование 12-недельных сеянцев сосны обыкновенной.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследований являлись 12-недельные сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), выращенные из семян 1-го класса качества (место сбора – Медвежьегорское центральное лесничество Республики Карелия, сбор 2017 г. в жестких пластмассовых кассетах типа Plantek 121 в условиях светоустановки при температуре 24°C, 16-часовом фотопериоде, освещенности 8 клк (по 80 шт. в каждом варианте опыта). Изучали влияние внесения в торфяной субстрат алюмосодержащего ВПО водоочистных сооружений г. Петрозаводска на рост, микоризообразование и локализацию химических элементов в органах и микоризе сеянцев. Объемная доля осадка в субстрате составляла по вариантам опыта от 0 до 100% с шагом 10%. Содержание в ВПО микроэлементов, включая тяжелые металлы, не превышало ПДК и ОДК, при этом особое внимание уделялось повышенному содержанию алюминия (табл. 1). В качестве контроля был принят торф с внесением доломитовой муки в дозе 1 г л<sup>-1</sup> торфа.

Кассеты наполняли подготовленным субстратом и засеивали семенами сосны. В стадии прорастания семян поддерживали условия 100%-й влажности воздуха. Отсутствие элементов минерального питания в осадке и смесях субстрата компенсировали подкормками комплексными удобрениями фирмы Kekkila (Степанов, Зайцева, 2015). Через 12 нед. выращивания сеянцы сосны выкапывали, корни промывали водой и определяли биометрические показатели растений — длину корней, стволика, охвоенной части, абсолютно сухую массу надземной части и корней. Для изучения микоризообразования на корнях сеянцев сосны и распределения химических элементов в микоризе и органах сеянцев были выбраны три варианта опыта: с объемной долей ВПО 60%, где отмечался активный рост сеянцев, 90%, вызывающий ингибирование роста, и контрольный вариант без внесения ВПО. Процесс образования микориз изучали на корнях 10 сеянцев сосны каждого из трех вариантов с применением общепринятых методов (Селиванов, 1981). Локализацию и соотношение зольных элементов (мас. %) в апикальных частях микоризы и органах сеянцев определяли у 5 сеянцев каждого варианта опыта методом энергодисперсионного рентгено-спектрального микроанализа. Исследовали 3 произвольно выбранных участка в каждом органе и микоризе сеянцев с использованием сканирующего микроскопа и энергодисперсионного анализатора Vega INCA Energy-350, Teskan Oxford, Чехия, Англия. Анализ данных проводили с использованием пакета программ Microsoft Excel с применением однофакторного дисперсионного анализа.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

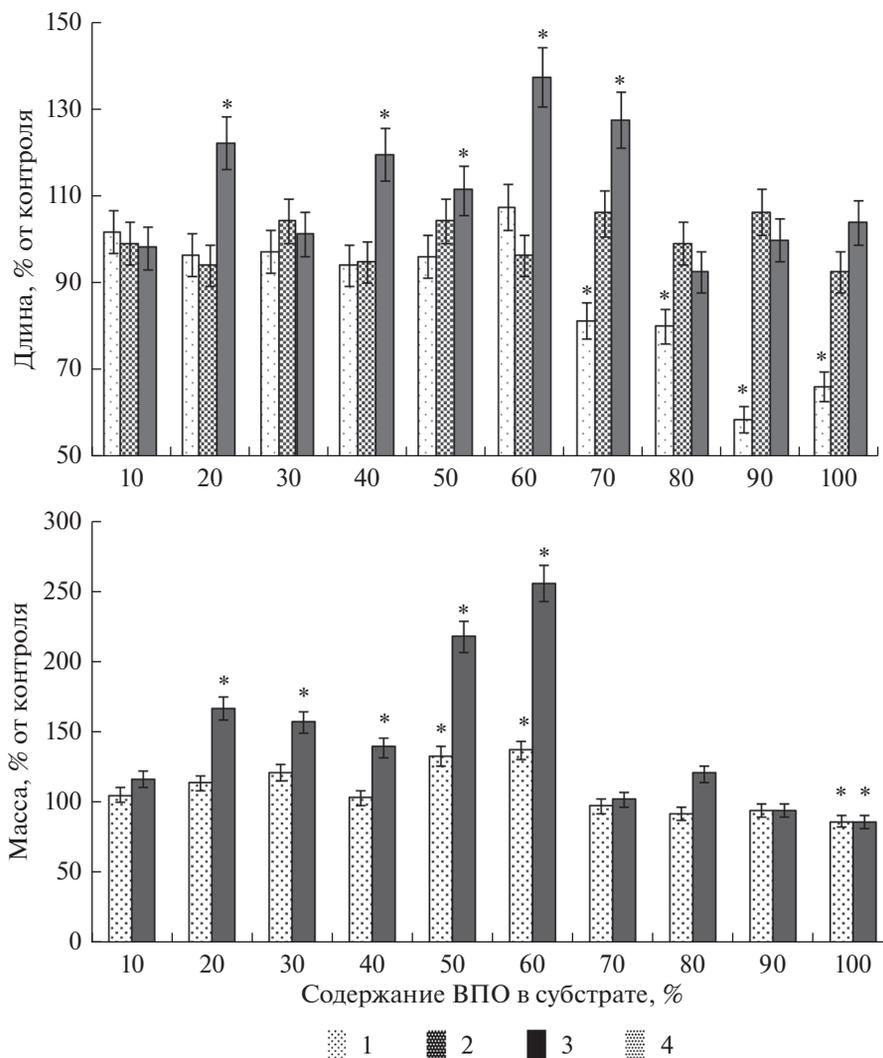
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**ВПО и рост сеянцев сосны (биометрические показатели).** Абсолютные значения биометрических показателей в контрольном варианте составили: длина охвоенной части — 11 мм, стволика — 41 мм, корней — 58 мм; сухая масса: надземной части — 37 мг, корней — 6 мг. Использование ВПО в качестве компонента торфяного субстрата при его объемной доле до 50% оказывало незначительное положительное влияние на рост 12-недельных сеянцев сосны. При внесении 60% наблюдалось существенное увеличение биометрических показателей сеянцев: длина корня и масса надземной части превышали эти показатели у контрольных растений в 1.3 раза, масса корня — в 2.5 раза (рис. 1). С увеличением доли ВПО в субстрате свыше 60% отмечалось снижение роста корней и охвоенной части. Показано, что алюмосодержащий осадок в

определенных дозах не оказывает отрицательного влияния на рост горчицы (Kim et al., 2002). Максимальное повышение показателей роста и урожайности пшеницы отмечается при внесении в почву вермикомпоста в комплексе с ВПО, что обусловлено улучшением физических свойств почвы (Ibrahim et al., 2015). Использование осадка в качестве удобрения способствует повышению урожайности зерновых культур (Янин, 2010). Внесение ВПО в торфяной субстрат в нашем эксперименте не повлияло на длину стволика сеянцев сосны. Относительное постоянство массы стволиков сосны обыкновенной наблюдается также в экспериментах с повышением питательной ценности грунта (Тебенкова и др., 2014) и при внесении различных доз стимулирующего рост хвойного экстракта (Егорова и др., 2017).

**ВПО и микоризообразование сеянцев сосны.** Внесение ВПО в торфяной субстрат в количестве 60% способствовало двукратному (по сравнению с контролем), увеличению плотности эктомикориз на корнях сеянцев сосны, тогда как при внесении 90% — этот показатель снижался. В контрольном варианте наблюдались простая и вильчатая формы микоризы, в варианте с внесением 60% ВПО отмечалось также формирование развитых (коралловидных) форм микоризных окончаний, тогда как в варианте с 90% ВПО присутствовали только простые формы. В условиях средней тайги микоризообразование облигатно для древесных растений (Савельев, 2018). Известно, что эктомикоризам соответствуют конкретные виды грибов, которых в Карелии выявлено 375 видов, из них 98 образуют эктомикоризы только с сосной (Шубин, 2004). На интенсивность микоризообразования корневых систем сеянцев большое влияние оказывает плодородие почвы. При выращивании сеянцев хвойных пород в питомниках на почвах с низким содержанием гумуса (1–2%) низкие показатели вегетативного роста и слабую степень микоризности корней имеют 30% однолетних сеянцев сосны (Барышников, Копытков, 2015). Внесение органоминеральных добавок и полимерных структурообразователей в почву способствует повышению роста корневой системы и развитию коралловидных форм эктомикоризы однолетних сеянцев сосны обыкновенной. При этом отмечается, что чем выше плотность микориз, тем большие значения имеют показатели, характеризующие рост и развитие сеянцев (Копытков, Коновалов, 2015).

**ВПО и локализация алюминия в органах и микоризе сеянцев сосны.** Для обнаружения и выявления локализации химических элементов в растениях, особенно в сложных биологических образцах, таких как эктомикориза, наиболее подходящим и надежным способом является ЭДРС микроанализ (Brunner, Frey, 2000). Сравнение результатов ЭДРС микроанализа сеянцев сосны контрольно-



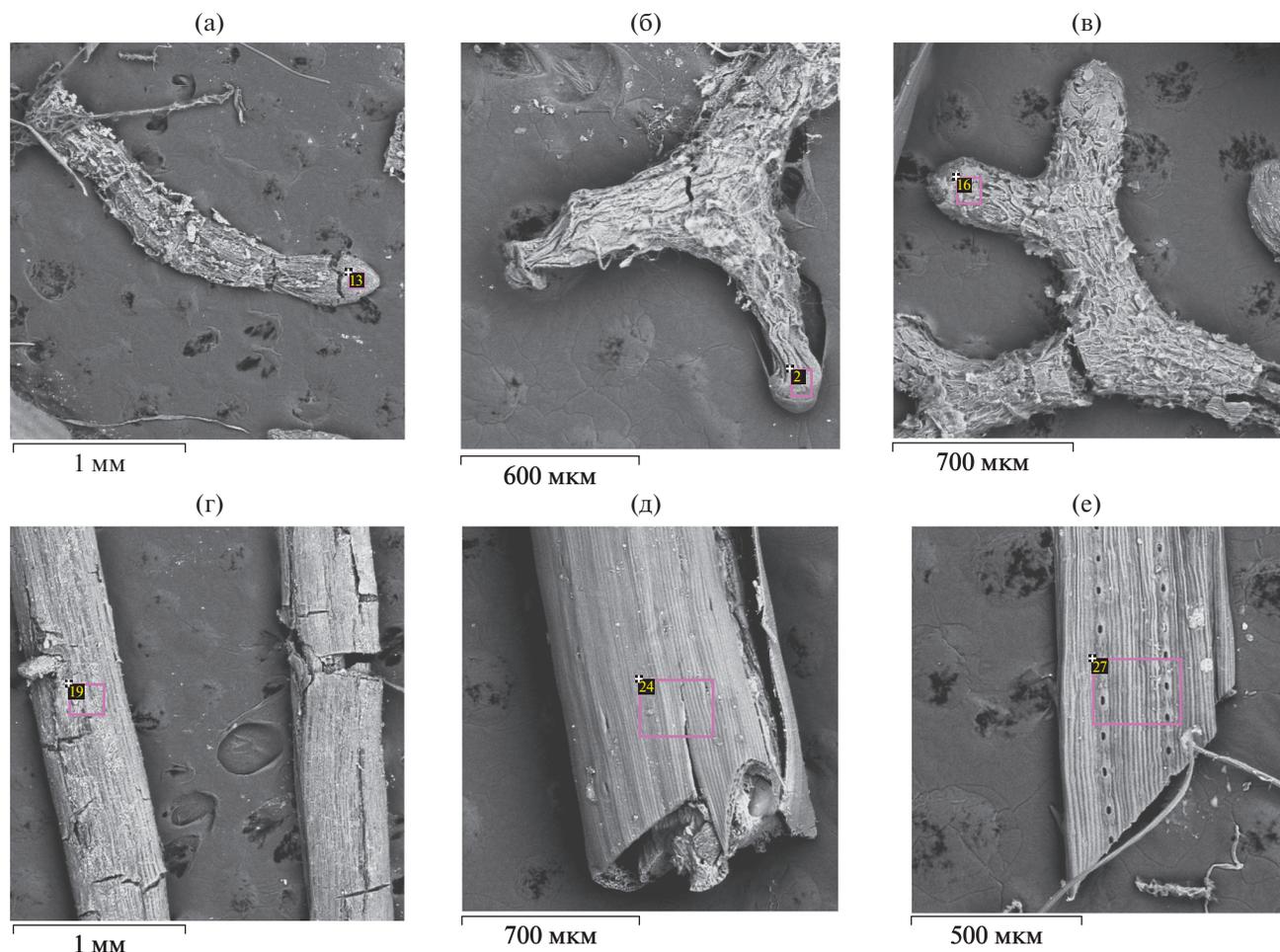
**Рис. 1.** Биометрические показатели 12-недельных сеянцев *Pinus sylvestris* L., выращенных на торфяных субстратах, содержащих различные объемные доли ВПО, % от контроля ( $p \leq 0.05$ ). 1 – охвоенная часть; 2 – ствол; 3 – корни; 4 – надземная часть.

го (без внесения ВПО) и двух опытных (60 и 90% ВПО) вариантов показало, что при внесении алюмосодержащего осадка в торфяной субстрат происходило увеличение доли алюминия в составе зольных элементов преимущественно в корнях и микоризе сеянцев (табл. 2, рис. 2). Отмечали различия по локализации алюминия в зависимости от формы микоризы – максимальный уровень алюминия был зафиксирован в апикальной части кораллоподобной формы.

Корневая система, непосредственно контактирующая с загрязненным субстратом, проявляет большую чувствительность к воздействию ионов металлов по сравнению с надземными органами (Ahmad et al., 2011). Доступность алюминия для растений коррелирует с уровнем кислотности почв (Vanguelova et al., 2007). Известно, что растворимость большинства минералов, в том числе

и гидроксидов алюминия, возрастает при  $pH < 4$  и  $pH > 8$  (Толпешта, Соколова, 2010). Алюмосодержащий водопроводный осадок водоочистных сооружений г. Петрозаводска имел слабокислую реакцию ( $pH_{\text{сол}} 5.3$ ) и при смешивании с верховым сфагновым торфом ( $pH_{\text{сол}} 2.9$ ) повышал  $pH$  до значений, оптимальных для сеянцев сосны обыкновенной (табл. 3). При этом  $pH$  полученных смесей находилась в диапазоне, обеспечивающем закрепление алюминия в почве. Корневые выделения в процессе роста могут изменять  $pH$  среды, обуславливая доступность различных элементов для растений (Gupta et al., 2013).

По содержанию в земной коре алюминий занимает третье место среди других элементов, а в биосфере – десятое (Амосова и др., 2007; Bhalerao, Prabhu, 2013). Алюмотолерантность растений



**Рис. 2.** Рентгеноспектральные снимки микорризы и органов сеянцев *Pinus sylvestris* L. (а) простая форма микорризы, (б) вильчатая форма микорризы, (в) коралловидная форма микорризы, (г) корень, (д) ствол, (е) хвоя.

имеет сложную природу и контролируется генетически (Амосова и др., 2007; Huang et al., 2010). Показано, что устойчивость сеянцев сосны ладанной к токсичному воздействию алюминия

связана с межклеточным связыванием поглощенного алюминия (Moyer-Henry et al., 2005), что контрастирует с его воздействием на чувствительный к алюминию вид сои (*Glycine max* L. Merr.), у

**Таблица 2.** Содержание (мас. % от суммы зольных элементов) алюминия и фосфора в апикальной части микорризы и органах сеянцев *Pinus sylvestris* L., выращенных на торфяных субстратах, содержащих различные объёмные доли ВПО

Вариант		Содержание ВПО в субстрате, %					
		0 (контроль)		60		90	
объект		элемент					
		Al	P	Al	P	Al	P
Микорриза	Простая	3.63	6.65	16.30*	11.06*	9.48*	7.43
	Вильчатая	0	10.25	6.31*	8.96	Нет	Нет
	Коралловидная	Нет	Нет	26.26*	0	Нет	Нет
Сеянцы	Корень	1.14	11.53	61.02*	4.28*	46.97*	3.28*
	Ствол	0	2.70	0	0*	2.97*	0*
	Хвоя	0	4.02	2.21*	1.86*	1.33*	1.20*

\* Различия достоверны по сравнению с контролем ( $p \leq 0.05$ ).

**Таблица 3.** Кислотность почвенного раствора различных вариантов смесей верхового сфагнового торфа и ВПО

рН	Вариант											
	содержание ВПО в субстрате, %											
	0*	0**	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	3.4	6.1	4.6	5.1	5.2	5.5	5.5	5.7	5.7	5.8	5.8	5.8
рН <sub>KCl</sub>	2.9	5.5	3.9	4.1	4.3	4.3	4.5	4.6	4.7	5.0	5.1	5.3

\* Торф.

\*\* Торф с доломитовой мукой из расчета внесения 1 г л<sup>-1</sup> торфа (контроль).

которой ингибирование роста сопровождается обширным проникновением алюминия в клетки меристематических тканей (Silva et al., 2000). Специфической реакцией на ионы Al<sup>3+</sup> для многих устойчивых к алюминию растений является стимуляция выработки органических кислот корневой системой (Широких, Ашихмина, 2016). Выделение янтарной, яблочной, лимонной и некоторых других кислот и их производных (малата, цитрата, оксалата, сукцината), которые хелатируют алюминий в корневой зоне почвы или связывают алюминий внутри клетки, считается эффективным механизмом устойчивости многих растений (Ma et al., 2001). Хелатировать алюминий также могут фосфаты (Широких, Ашихмина, 2016) и фенолы (Heim et al., 2000).

Микориза может ограничивать проникновение алюминия в клетки корня (Jentschke, Godbold, 2000). Показано, что она способствует большей устойчивости сеянцев сосны ладанной и сосны Эллиота (*Pinus elliotii* Engelm.) к повышенным концентрациям алюминия (Nowak, Friend, 2006). Эктомикориза представляет собой первую линию защиты, осуществляемую путем производства или стимуляции выработки грибным чехлом шавелевой кислоты (Ahoenon-Jonnarth et al., 2000), которая связывает алюминий и предотвращает его абсорбцию. Микориза повышает гидрофобность корней и действует как барьер, ограничивая движение ионов по направлению к тканям корня (Bucking et al., 2002). В корнях сеянцев сосны ладанной, колонизированных клетками гриба *Pisolithus tinctorius*, большое количество алюминия накапливается в гифах грибоного чехла, сети Гартига и мицелии на апикальной части бокового корня (Moyer-Henry et al., 2005).

При внесении ВПО в субстрат в стволиках сеянцев сосны было выявлено наличие алюминия только в варианте с 90% осадка, в хвое алюминий обнаружен в двух вариантах опыта (60 и 90% ВПО). В работах J. Nowak, A.L. Friend (1995, 2006) показана отрицательная зависимость между накоплением алюминия в хвое и ростом сеянцев хвойных пород. В нашем эксперименте с внесением ВПО в субстрат, несмотря на обнаружение алюминия в хвое и значительное его доминирова-

ние в составе зольных элементов корней, при дозе 60% происходила стимуляция роста сеянцев. В связи с тем, что содержание малоподвижных элементов, таких как Ca, Al, Fe, может изменяться в хвое с возрастом (Артемкина и др., 2016), представляет интерес исследование статуса алюминия у опытных сеянцев при дальнейшем росте и развитии.

С превышением объемной доли осадка в субстрате 60%-й величины биометрические показатели сеянцев сосны снижались, отмечался значительный отпад сеянцев в вариантах с внесением осадка в количестве 90 и 100%. Важное значение при выращивании контейнерных растений имеют агрофизические характеристики субстрата (Schmilewski, 2008; Fields et al., 2014). При внесении в торфяной субстрат высоких доз ВПО, представляющего собой гелеобразную массу, агрофизические свойства полученных смесей изменялись и не соответствовали технологии выращивания, разработанной в расчете на верховой сфагновый торф. Для поддержания постоянной влажности кома субстрата в ячейках кассет требовался учащенный режим полива, и даже незначительные отклонения от него приводили к необратимым последствиям: происходило иссушение субстрата, что, возможно, было основной причиной снижения биометрических показателей сеянцев и даже их гибели. При последующих поливах свойства кома полностью не восстанавливались.

**ВПО и локализация фосфора в органах и микоризе сеянцев сосны.** При внесении ВПО в субстрат отмечалось снижение доли фосфора в составе зольных элементов в органах сеянцев сосны и повышение — в простой форме микоризы. Показана способность алюмосодержащих осадков поглощать фосфор и превращать его в формы, недоступные для роста растений (Kim et al., 2002). Микориза способствует росту растений при воздействии алюминия за счет повышения интенсивности поглощения фосфора из почвенного субстрата (Schier, McQuattie, 1996). Регулярные подкормки комплексными удобрениями в нашем эксперименте также могли способствовать снижению негативного действия алюминия при внесении осадка. Отмечается снижение токсичного действия алюминия

на растения *Citrus sinensis* (Yang et al., 2011) и *Lespedeza bicolor* (Sun et al., 2008) при внесении в субстрат фосфора.  $Mg^{2+}$  активирует ферменты, участвующие в биосинтезе и деградации органических кислот в корнях растений (Bose et al., 2011).

**Заключение.** Результаты проведенных исследований показали, что использование ВПО в определенных дозах в качестве компонента контейнерного субстрата оказывало положительное влияние на рост сеянцев сосны обыкновенной и формирование микоризы. При объемной доле осадка 60% происходило существенное увеличение биометрических показателей сеянцев по сравнению с контролем: длина корня и масса надземной части повышались в 1.3 раза, масса корня – в 2.5 раза. При этом наблюдалось двукратное (по сравнению с контролем) увеличение плотности эктомикориз на корнях сеянцев сосны, отмечалось появление кораллоподобной формы микоризы. ЭДРС-микроанализ показал значительное увеличение доли алюминия в составе зольных элементов в корне и микоризе сеянцев под влиянием алюмосодержащего осадка в дозе 60%. Интенсивный рост сеянцев этого варианта свидетельствовал об устойчивости их к высоким концентрациям алюминия в субстрате. При увеличении доли ВПО свыше 60% стимулирующий рост эффект снижался до ингибирования. Внесение осадка в субстрат приводило к снижению доли фосфора в составе зольных элементов в органах сеянцев и повышению – в простой форме микоризы. При высоких дозах осадка агрофизические свойства смесей не соответствовали требованиям технологии контейнерного малообъемного выращивания, рассчитанной на субстрат из чистого верхового сфагнового торфа, что, вероятно, обуславливало ингибирование роста сеянцев. Внесение осадка приводило к повышению pH почвенных растворов, и это позволяет предлагать для разработки технологию приготовления торфяного субстрата с включением ВПО без внесения известкующих материалов. Исследования показали, что применение ВПО в определенных дозах при приготовлении торфяных контейнерных субстратов для выращивания сеянцев хвойных пород может стать перспективной ресурсосберегающей технологией. Необходимы дальнейшие исследования ВПО-содержащих субстратов, их агрохимических и агрофизических характеристик, проведение испытаний по их использованию при выращивании сеянцев различных видов древесных растений, обладающих различной алюмотолерантностью, для получения высококачественного посадочного материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амосова Н.В., Николаева О.Н., Сынзыныс Б.И. Механизмы алюмотолерантности у культурных растений // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 1. С. 36–42.
- Артемкина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В. Химический состав хвои *Juniperus sibirica* (Cupressaceae) в экотоне лес – тундра (Хибинские горы) // Экология. 2016. № 4. С. 243–250.
- Барышников Г.Я., Копытков В.В. Выращивание сеянцев хвойных пород с высокой степенью микоризности корней // Вестник Алтайского гос. аграрного университета. 2015. № 5 (127). С. 76–80.
- Демаков Ю.П., Швецов С.М., Майшанова М.И. Изменение зольного состава хвои, коры и древесины сосны в зоне выбросов завода силикатного кирпича // Вестник Поволжского гос. технологического университета. 2012. № 1. С. 85–95.
- Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия растительного сырья. 2017. № 2. С. 171–180. <https://doi.org/10.14258/jcprgm.2017021720>
- Зайцева М.И., Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой // Вестник Московского гос. университета леса – Лесной вестник. 2010. № 1. С. 4–8.
- Копытков В.В., Коновалов В.Н. Лесоводственная эффективность применения коровьих компостов при выращивании сеянцев хвойных пород // Arctic Environmental Research. 2015. № 2. С. 56–64.
- 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 & Technology. 2015. Т. 12. № 1. С. 47–76.
- Савельев Л.А. Эктомикоризы берез в условиях города в средней подзоне тайги // Научная жизнь. 2018. № 5. С. 67–79.
- Селиванов И.А. Микосимбиотрофизм как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. М.: Наука, 1981. 232 с.
- Степанов С.А., Зайцева М.И. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2016. 31 с.
- Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Воробьев Р.А., Орлова М.А. Всхожесть семян и биометрические показатели сеянцев на субстратах из твердых отходов целлюлозно-бумажной промышленности // Лесоведение. 2014. № 6. С. 31–40.
- Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Орлова М.А., Гагарин Ю.Н. Оценка потенциала использования биосубстратов из твердых отходов целлюлозно-бумажной промышленности для лесовыращивания // Лесоведение. 2017. № 4. С. 270–283.
- Толпеита И.И., Соколова Т.А. Подвижные соединения алюминия в почвах катен южной тайги (на примере почв Центрально-Лесного заповедника) // Почвоведение. 2010. № 8. С. 956–968.
- Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Егорова А.В., Зайцева М.И., Робонен Е.В. Современные технологии

- выращивания посадочного материала хвойных пород и пути их совершенствования // Вестник Московского гос. университета леса – Лесной вестник. 2016. № 6. С. 6–14.
- 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.
- Шубин В.И. Особенности организации макромицетов-симбиотрофов в лесных экосистемах // Грибные сообщества лесных экосистем. Материалы координационных исследований. М.; Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. Т. 2. С. 272–286.
- Янин Е.П. Осадок водопроводных станций (состав, обработка, утилизация) // Экологическая экспертиза. 2010. № 5. С. 3–45.
- Ahmad M.S.A., Ashraf M., Tabassam Q., Hussain M., Firdous H. Lead (Pb)-induced regulation of growth, photosynthesis, and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) plants at early growth stages // Biological Trace Element Research. 2011. V. 144. P. 1229–1239.
- Ahonen-Jonnarth U., Van H.P., Lundstrom U., Finlay R. Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminum and heavy metal concentrations // New Phytologist. 2000. V. 146. P. 557–567.
- Bhalerao S.A., Prabhu D.V. Aluminium Toxicity in Plants—A Review // J. Applicable Chemistry. 2013. V. 2. № 3. P. 447–474.
- Bhattacharjee S., Zhao Y.H., Hill J.M., Percy M.E., Lukiw W.J. Aluminium and its potential contribution to Alzheimer's disease (AD) // Front Aging Neurosci. 2014. V. 6. № 62. P. 1–3.
- Bohne H. Growth of nursery crops in peat- reduced and in peat-free substrates // Acta Horticulturae. 2004. V. 644. P. 103–106.
- Bose J., Babourina O., Rengel Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants // J. Experimental Botany. 2011. V. 62. № 7. P. 2251–2264.
- Brunner I., Frey B. Detection and localization of aluminum and heavy metals in ectomycorrhizal Norway spruce seedlings // Environmental Pollution. 2000. V. 108. P. 121–128.
- Brunner I., Sperisen C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants // Frontiers in Plant Science. 2013. V. 4. P. 1–12.
- Bucking H., Kuhn A., Schroder W., Heyser W. The fungal sheath of ectomycorrhizal pine roots: an apoplastic barrier for the 2 entry of calcium, magnesium, and potassium into the root cortex? // J. Experimental Botany. 2002. V. 53. P. 1659–1669.
- Dassanayake K.B., Jayasinghea G.Y., Surapanenic A., Hetherington C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges // Waste Management. 2015. V. 38. № 1. P. 321–335.
- Exley C. The coordination chemistry of aluminium in neurodegenerative disease // Coord Chem Rev. 2012. V. 256. P. 2142–2146.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2012.02.020>
- Fields J.S., Fonteno W.C., Jackson B.E. Hydrophysical properties, moisture retention, and drainage profiles of wood and traditional components for greenhouse. Substrates // HortScience. 2014. V. 49. № 6. P. 827–832.
- Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: A review // American Journal of Plant Sciences. 2013. V. 4. P. 21–37.
- Heim A., Luster J., Brunner I., Frey B., Frossard E. Effects of aluminum treatment on Norway spruce roots: Aluminum binding forms, element distribution, and release of organic substances // Plant & Soil. 2000. V. 216. P. 103–116.
- Huang C.F., Yamaji N., Ma J.F. Knockout of a bacterial-type atp-binding cassette transporter gene, AtSTAR1, results in increased aluminum sensitivity in *Arabidopsis* // Plant Physiology. 2010. V. 153. P. 1669–1677.
- Ibrahim M.M., Mahmoud E.K., Ibrahim D.A. Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield // International Agrophysics. 2015. V. 29. P. 157–164.  
<https://doi.org/10.1515/intag-2015-0029>
- Jackson B.E., Wright R.D. Pine tree substrate: an alternative and renewable substrate for horticultural crop production // Acta Horticulturae. 2009. V. 819. P. 265–272.
- Jentschke G., Godbold D. Metal toxicity and ectomycorrhizas // Physiologia Plantarum. 2000. V. 109. P. 107–116.
- Kim G.J., Lee S.S., Moon H.S., Kang I.M. Land application of alum sludge from water purification plant to acid mineral soil treated with acidic water // J. Plant Nutrition & Soil Science. 2002. V. 48. № 1. P. 15–22.
- Ma J.F., Ryan P.R., Delhaize E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids // Trends in Plant Science. 2001. V. 6. P. 273–278.
- Moyer-Henry K., Silva I., Macfall J., Johannes E., Allen N., Goldfarb B., Ruffy T. Accumulation and localization of aluminium in root tips of loblolly pine seedlings and the associated ectomycorrhiza *Pisolithus tinctorius* // Plant, Cell & Environment. 2005. V. 28. P. 111–120.
- Nowak J., Friend A.L. Aluminum sensitivity of loblolly pine and slash pine seedlings grown in solution culture // Tree Physiology. 1995. V. 15. P. 605–609.
- Nowak J., Friend A.L. Loblolly pine and slash pine responses to acute aluminum and acid exposures // Tree Physiology. 2006. V. 26. P. 1207–1215.
- Schier G., McQuattie C. Response of ectomycorrhizal and nonmycorrhizal pitch pine (*Pinus rigida*) seedlings to nutrient supply and aluminium: Growth and mineral nutrition // Canadian J. Forest Research. 1996. V. 26. P. 2145–2152.
- Schmilewski G. The role of peat in assuring the quality of growing media // Mires & Peat. 2008. V. 3. P. 1–8.
- Silva I., Smyth T., Moxley D., Carter T., Allen N., Ruffy T. Aluminum accumulation of nuclei of cells in the root tip: Fluorescent detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy // Plant Physiology. 2000. V. 123. P. 543–552.
- Sun Q.B., Shen R.F., Zhao X.Q., Chen R.F., Dong X.Y. Phosphorus enhances Al resistance in Al-resistant *Lespedeza bicolor* but not in Al-sensitive *L. cuneata* under relatively high Al stress // Annals of Botany. 2008. V. 102. № 5. P. 795–804.
- Vanguelova E.I., Hirano Y., Eldhuset T.D., Sas-Paszt L., Bakker M.R., Püttseppe Ü., Brunner I., Löhmus K., Godbold D. Tree fine root Ca/Al molar ratio – Indicator of Al and acidity stress // Plant Biosystems. 2007. V. 141. № 3. P. 460–480.
- Wright R.D., Browder J.F., Jackson B.E. Ground pine chips as a substrate for container-grown woody nursery crops // Journal of Environmental Horticulture. 2006. V. 24. P. 181–184.
- Yang L.T., Jiang H.X., Tang N., Chen L.S. Mechanisms of aluminum-tolerance in two species of citrus: secretion of organic acid anions and immobilization of aluminum by phosphorus in roots // Plant Science. 2011. V. 180. № 3. P. 521–530.

## Organomineral Substrate Containing Aluminum Affects Scotch Pine's Growth and Mycorrhiza Formation

A. V. Egorova<sup>1,\*</sup>, N. P. Chernobrovkina<sup>1</sup>, E. V. Robonen<sup>1</sup>, L. A. Savel'ev<sup>1</sup>,  
M. I. Zajtseva<sup>2</sup>, and A. N. Ternovoj<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Forest Research Institute of Karelian Research Centre RAS, 11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Karelia, 185910 Russia

<sup>2</sup>Petrozavodsk State University, 33 Lenin Pr., Petrozavodsk, Karelia, 185910 Russia

<sup>3</sup>Geology Institute of Karelian Research Centre RAS, 11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Karelia, 185910 Russia

\*E-mail: egorova@krc.karelia.ru

Received 12 September 2018

Edited 5 March 2019

Accepted 5 June 2019

An assessment was carried out to measure the effect of using the organomineral water treatment sediments (WTS), containing aluminum and produced by the water treatment facilities of Petrozavodsk, as a component of a container peat-based substrate on growth and mycorrhiza formation of Scotch pine seedlings (*Pinus sylvestris* L.), as well as on the allocation of aluminum and phosphorus in their ectomycorrhiza and organs. A volume fraction of sediments in the substrate ranged from 0 (control) to 100%. With the concentration reaching 60%, the biometrical characteristics of seedlings were higher than in control cases: root's length and aboveground biomass increased by 1.3, root mass by 2.5, well-developed mycorrhiza was observed. Energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed the increased aluminum content in roots and mycorrhiza and phosphorus – in mycorrhiza while in organs the phosphorus content was lower than in control. An intense growth of those seedlings indicated their tolerance to higher concentrations of aluminum in the substrate. By having a subacid reaction, WTS increase the pH of the substrate to optimum values for Scotch pine seedlings. Peat substrates with a volume fraction of WTS more than 60% proved to be inadequate for the technology of contained small-scale growing, which was probably caused by a decrease in a stimulating effect to the extent of inhibition.

**Keywords:** *Pinus sylvestris*, seedlings, mycorrhiza, water treatment sediments, container peat substrate, aluminum, phosphorus.

**Acknowledgements:** The study was financed through federal budget allocations for implementation of state order to KarRC RAS (Forest Research Institute KarRC RAS).

### REFERENCES

- Ahmad M.S.A., Ashraf M., Tabassam Q., Hussain M., Firdous H., Lead (Pb)-induced regulation of growth, photosynthesis, and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) plants at early growth stages, *Biological Trace Element Research*, 2011, Vol. 144, pp. 1229–1239.
- Ahonen-Jonnarh U., Van H.P., Lundstrom U., Finlay R., Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminum and heavy metal concentrations, *New Phytologist*, 2000, Vol. 146, pp. 557–567.
- Amosova N.V., Nikolaeva O.N., Synzynys B.I., Mekhanizmy alyumotolerantnosti u kul'turnykh rastenii (Mechanisms of aluminium tolerance in cultivated plants), *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2007, No. 4, pp. 36–42.
- Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V., Khimicheskii sostav khvoi *Juniperus sibirica* (Cupressaceae) v ekotone les – tundra (Khibinskie gory) (Chemical composition of *Juniperus sibirica* needles (Cupressaceae) in the forest–tundra ecotone, the Khibiny Mountains), *Ekologiya*, 2016, No. 4, pp. 243–250.
- Baryshnikov G.Y., Kopytkov V.V., Vyrashchivanie seyantsev khvoinykh porod s vysokoi stepen'yu mikoriznosti kornei (Cultivation of seedlings of coniferous species with a high degree of root mycorrhization), *Vestnik Altaiskogo gos. agrarnogo universiteta*, 2015, No. 5(127), pp. 76–80.
- Bhalerao S.A., Prabhu D.V., Aluminium Toxicity in Plants—A Review, *J. Applicable Chemistry*, 2013, Vol. 2, No. 3, pp. 447–474.
- Bhattacharjee S., Zhao Y.H., Hill J.M., Percy M.E., Lukiw W.J., Aluminium and its potential contribution to Alzheimer's disease (AD), *Front Aging Neurosci*, 2014, Vol. 6, No. 62, pp. 1–3.
- Bohne H., Growth of nursery crops in peat- reduced and in peat-free substrates, *Acta Horticulturae*, 2004, Vol. 644, pp. 103–106.
- Bose J., Babourina O., Rengel Z., Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants, *J. Experimental Botany*, 2011, Vol. 62, No. 7, pp. 2251–2264.
- Brunner I., Frey B., Detection and localization of aluminum and heavy metals in ectomycorrhizal Norway spruce seedlings, *Environmental Pollution*, 2000, Vol. 108, pp. 121–128.
- Brunner I., Sperisen C., Aluminum exclusion and aluminium tolerance in woody plants, *Frontiers in Plant Science*, 2013, Vol. 4, pp. 1–12.
- Bucking H., Kuhn A., Schroder W., Heyser W., The fungal sheath of ectomycorrhizal pine roots: an apoplastic barrier for the 2 entry of calcium, magnesium, and potassium into the root cortex? *J. Experimental Botany*, 2002, Vol. 53, pp. 1659–1669.

- Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Robonen E.V., *Sovremennyye tekhnologii vyrashchivaniya posadochnogo materiala khvoinykh porod i puti ikh sovershenstvovaniya* (Modern technologies growing planting material of coniferous species and ways to improve them), *Vestnik Moskovskogo gos. universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2016, No. 6, pp. 6–14.
- Dassanayakea K.B., Jayasinghea G.Y., Surapanenic A., Hetherington C., A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges, *Waste Management*, 2015, Vol. 38, No. 1, pp. 321–335.
- Demakov Y.P., Shvetsov S.M., Maishanova M.I., *Izmeneniye zol'nogo sostava khvoi, kory i drevesiny sosny v zone vybrosov zavoda silikatnogo kirpicha* (Ash content changes in needle, rind and wood of Scots pine within the zone of sand-lime brick plant emissions), *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, No. 1, pp. 85–95.
- Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., *Vliyaniye khvoynogo preparata na rost i elementnyi sostav seyantsev Pinus sylvestris L. v usloviyakh lesnogo pitomnika* (Effect of application of a conifer derived chemical on the growth and elemental composition of *Pinus sylvestris* L. seedlings in a forest nursery), *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2017, No. 2, pp. 171–180.
- Exley C., The coordination chemistry of aluminium in neurodegenerative disease, *Coord Chem Rev*, 2012, Vol. 256, pp. 2142–2146.
- Fields J.S., Fonteno W.C., Jackson B.E., *Hydrophysical properties, moisture retention, and drainage profiles of wood and traditional components for greenhouse. Substrates*, *HortScience*, 2014, Vol. 49, No. 6, pp. 827–832.
- Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A., *Molecular basis of aluminium toxicity in plants: A review*, *American Journal of Plant Sciences*, 2013, Vol. 4, pp. 21–37.
- Heim A., Luster J., Brunner I., Frey B., Frossard E., *Effects of aluminum treatment on Norway spruce roots: Aluminum binding forms, element distribution, and release of organic substances*, *Plant & Soil*, 2000, Vol. 216, pp. 103–116.
- Huang C.F., Yamaji N., Ma J.F., *Knockout of a bacterial-type atp-binding cassette transporter gene, AtSTAR1, results in increased aluminum sensitivity in Arabidopsis*, *Plant Physiology*, 2010, Vol. 153, pp. 1669–1677.
- Ibrahim M.M., Mahmoud E.K., Ibrahim D.A., *Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield*, *International Agrophysics*, 2015, Vol. 29, pp. 157–164.
- Jackson B.E., Wright R.D., *Pine tree substrate: an alternative and renewable substrate for horticultural crop production*, *Acta Horticulturae*, 2009, Vol. 819, pp. 265–272.
- Jentschke G., Godbold D., *Metal toxicity and ectomycorrhizas*, *Physiologia Plantarum*, 2000, Vol. 109, pp. 107–116.
- Kim G.J., Lee S.S., Moon H.S., Kang I.M., *Land application of alum sludge from water purification plant to acid mineral soil treated with acidic water*, *J. Plant Nutrition & Soil Science*, 2002, Vol. 48, No. 1, pp. 15–22.
- Kopytkov V.V., Kononov V.N., *Lesovodstvennaya effektivnost' primeneniya korovykh kompostov pri vyrashchivaniy seyantsev khvoinykh porod* (Silvicultural efficiency of cow composts application at seedling cultivation of conifers), *Arctic Environmental Research*, 2015, No. 2, pp. 56–64.
- Ma J.F., Ryan P.R., Delhaize E., *Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids*, *Trends in Plant Science*, 2001, Vol. 6, pp. 273–278.
- Moyer-Henry K., Silva I., Macfall J., Johannes E., Allen N., Goldfarb B., Rufty T., *Accumulation and localization of aluminium in root tips of loblolly pine seedlings and the associated ectomycorrhiza Pisolithus tinctorius*, *Plant, Cell & Environment*, 2005, Vol. 28, pp. 111–120.
- Nowak J., Friend A.L., *Aluminum sensitivity of loblolly pine and slash pine seedlings grown in solution culture*, *Tree Physiology*, 1995, Vol. 15, pp. 605–609.
- Nowak J., Friend A.L., *Loblolly pine and slash pine responses to acute aluminum and acid exposures*, *Tree Physiology*, 2006, Vol. 26, pp. 1207–1215.
- Robonen E.V., Zaitseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasil'ev S.B., *Opyt razrabotki i ispol'zovaniya konteynernykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Al'ternativy torfu* (An experience of designing and applying non-peat substrates for forest nursery containers. Peat alternatives.), *Resources & Technology*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 47–76.
- Savel'ev L.A., *Ektomikorizy berez v usloviyakh goroda v srednei podzone taigi* (Birch ectomycorrhizas in urban conditions in the middle taiga subzone), *Nauchnaya zhizn'*, 2018, No. 5, pp. 67–79.
- Schier G., Mcquattie C., *Response of ectomycorrhizal and nonmycorrhizal pitch pine (Pinus rigida) seedlings to nutrient supply and aluminium: Growth and mineral nutrition*, *Canadian J. Forest Research*, 1996, Vol. 26, pp. 2145–2152.
- Schmilewski G., *The role of peat in assuring the quality of growing media*, *Mires & Peat*, 2008, Vol. 3, pp. 1–8.
- Selivanov I.A., *Mikosimbioz kak forma konsortivnykh svyazei v rastitel'nom pokrove Sovetskogo Soyuza* (Microsymbiotrophism as a form of consortive relations in vegetation cover of USSR), Moscow: Nauka, 1981, 232 p.
- Shirokikh I.G., Ashikhmina T.Ya., *Povysheniye tolerantnosti rastenii k alyuminiyu na kislykh pochvakh metodami biotekhnologii (obzor)* (Plant improvement for tolerance to aluminium in acid soils by of biotechnology methods (review)), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2016, No. 2, pp. 12–19.
- Shubin V.I., *Osobennosti organizatsii makromitsetov-simbiozov v lesnykh ekosistemakh* (Specifics of organization of symbiotrophic macromycetes in forest ecosystems), In: *Gribnye soobshchestva lesnykh ekosistem. Materialy koordinatsionnykh issledovaniy* (Fungal communities of forest ecosystems. Coordinating research data), Moscow–Petrozavodsk: Izd-vo KarNTs RAN, 2004, Vol. 2, pp. 272–286.
- Silva I., Smyth T., Moxley D., Carter T., Allen N., Rufty T., *Aluminum accumulation of nuclei of cells in the root tip: Fluorescent detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy*, *Plant Physiology*, 2000, Vol. 123, pp. 543–552.
- Stepanov S.A., Zaitseva M.I., *Vyrashchivaniye i ispol'zovaniye posadochnogo materiala s zakrytoi kornevoi sistemoi*, Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2016, 31 p.
- Sun Q.B., Shen R.F., Zhao X.Q., Chen R.F., Dong X.Y., *Phosphorus enhances Al resistance in Al-resistant Lespedeza bicolor but not in Al-sensitive L. cuneata under relatively high Al stress*, *Annals of Botany*, 2008, Vol. 102, No. 5, pp. 795–804.

- Teben'kova D.N., Lukina N.V., Orlova M.A., Gagarin Yu.N., Otsenka potentsiala ispol'zovaniya biosubstratov iz tverdykh otkhodov tsellyulozno-bumazhnoi promyshlennosti dlya lesovyrashchivaniya (Potential application of bio-substrates made of solid wastes of pulp-paper industry in silviculture), *Lesovedenie*, 2017, No. 4, pp. 270–283.
- Teben'kova D.N., Lukina N.V., Vorob'ev R.A., Orlova M.A., Vskhozhest' semyan i biometricheskie pokazateli seyantsev na substratakh iz tverdykh otkhodov tsellyulozno-bumazhnoi promyshlennosti (Germination and biometric parameters of seedlings grown on solid pulp and paper waste medium), *Lesovedenie*, 2014, No. 6, pp. 31–40.
- Tolpeshta I.I., Sokolova T.A., Podvizhnye soedineniya alyuminiya v pochvakh katen yuzhnoi taigi (na primere pochv Tsentral'no-Lesnogo zapovednika) (Mobile aluminum compounds in soils of the southern taiga (soils of the central forest reserve as an example)), *Pochvovedenie*, 2010, No. 8, pp. 956–968.
- Vanguelova E.I., Hirano Y., Eldhuset T.D., Sas-Paszt L., Bakker M.R., Püttsepp Ü., Brunner I., Löhmus K., Godbold D., Tree fine root Ca/Al molar ratio – Indicator of Al and acidity stress, *Plant Biosystems*, 2007, Vol. 141, No. 3, pp. 460–480.
- Wright R.D., Browder J.F., Jackson B.E., Ground pine chips as a substrate for container-grown woody nursery crops, *Journal of Environmental Horticulture*, 2006, Vol. 24, pp. 181–184.
- Yang L.T., Jiang H.X., Tang N., Chen L.S., Mechanisms of aluminum-tolerance in two species of citrus: secretion of organic acid anions and immobilization of aluminum by phosphorus in roots, *Plant Science*, 2011, Vol. 180, No. 3, pp. 521–530.
- Yanin E.P., Osadok vodoprovodnykh stantsii (sostav, obrabotka, utilizatsiya) (Water treatment sediments (composition, processing, utilization)), *Ekologicheskaya ekspertiza*, 2010, No. 5, pp. 3–45.
- Zaitseva M.I., Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Ispol'zovanie porubochnykh ostatkov dlya prigotovleniya torfyanykh substratov pri vyrashchivanii seyantsev sosny obyknovЕННОЙ s zakrytoi kornevoi sistemoi (Utilization of logging residues in preparation of peat substrates for closed root growing of Scots pine seedlings), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2010, No. 1, pp. 4–8.