
БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

BIOTECHNOLOGY AND MICROBIOLOGY

УДК 631.8, 633.877

ОСОБЕННОСТИ РОСТА СЕЯНЦЕВ *PINUS SYLVESTRIS* И *PICEA ABIES* НА ТОРФЯНО-ПЕРЛИТНЫХ СУБСТРАТАХ, ОБОГАЩЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ И МИНЕРАЛЬНЫМИ УДОБРЕНИЯМИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВЫСВОБОЖДЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Е. АРТИШЕВСКАЯ¹⁾, А. Ю. ШАШКО¹⁾, А. А. ОВСЕЙ²⁾, Р. С. НЕДЕЛЬКО¹⁾,
В. Ю. БОНДАРЕНКО¹⁾, М. А. ЧЕРНЫШ¹⁾, П. В. ГРИУСЕВИЧ¹⁾, О. Г. ЯКОВЕЦ¹⁾,
Н. А. ЛАМАН³⁾, А. И. СОКОЛИК¹⁾, В. В. ДЕМИДЧИК³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр, автодорога Р-1, 17-й километр,
223049, район д. Волковичи, Щомыслицкий с/с, Минский р-н, Беларусь

³⁾Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследования особенностей влияния компонентного состава торфяно-перлитных субстратов на рост сеянцев *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная) и *Picea abies* (L.) H. Karst. (ель европейская) при их культивировании в кассетах в течение одного вегетационного сезона. В качестве компонентов

Образец цитирования:

Артишевская ВЕ, Шашко АЮ, Овсей АА, Неделько РС, Бондаренко ВЮ, Черныш МА, Гриусевич ПВ, Яковец ОГ, Ламан НА, Соколик АИ, Демидчик ВВ. Особенности роста сеянцев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* на торфяно-перлитных субстратах, обогащенных органическими добавками и минеральными удобрениями с контролируемым высвобождением элементов. *Экспериментальная биология и биотехнология*. 2025;2:44–57.
EDN: PTGWGL

For citation:

Artishevskaya VE, Shashko AYU, Ovsey AA, Nedelko RS, Bandarenka UYu, Charnysh MA, Hryvusevich PV, Yakovets OG, Laman NA, Sokolik AI, Demidchik VV. Growth characteristics of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings in peat-pearlite substrates enriched with organic and mineral controlled-release fertilisers. *Experimental Biology and Biotechnology*. 2025;2: 44–57. Russian.
EDN: PTGWGL

Сведения об авторах см. на с. 57.

Information about the authors see p. 57.

почвенных субстратов испытаны капсульно-мембранные удобрения пролонгированного действия (удобрения с контролируемым высвобождением (*controlled-release fertilisers*, CRF)) «Basacote» и «Top Substra», водорастворимое специализированное удобрение для минерального обогащения торфа «PG mix», цеолитное удобрение пролонгированного действия «ЦИОН», органические добавки «Organicum» и «Биогумус» на основе сухого куриного помета и вермикултуры соответственно, а также трепел, вермикулит и льняная костра. Продemonстрировано, что на ранней стадии роста (42 сут) сеянцы ели европейской росли быстрее на субстратах с органической добавкой «Organicum» (высушенный и простерилизованный куриный помет), тогда как в более поздние фазы вегетации (56–91 сут) они росли и развивались наиболее интенсивно на субстратах с добавлением удобрения «Basacote» (капсулы, содержащие макро- и микроэлементы, покрытые неорганической полимерной мембраной). Для сеянцев сосны обыкновенной скорость роста как в ранние, так и в поздние фазы вегетации (42–91 сут) была наибольшей при их культивировании на субстратах, содержащих специализированное удобрение для обогащения торфа «PG mix» (без раскисления; pH 2,7–3,2). Введение в субстраты удобрений (добавок) «Top Substra», «ЦИОН» и «Биогумус» имело значительно меньший ростостимулирующий эффект, чем введение удобрений «Basacote», «Organicum» и «PG mix». Выявлены корреляции между насыщенностью почвенного раствора электролитами (тест на электропроводность), уровнем pH и ростовыми показателями, выполнено цифровое фенотипирование надземной части молодых растений ели и сосны.

Ключевые слова: почвенный субстрат; удобрение с контролируемым высвобождением; сосна обыкновенная; ель европейская; сеянцы хвойных пород; рост и развитие растений.

GROWTH CHARACTERISTICS OF *PINUS SYLVESTRIS* AND *PICEA ABIES* SEEDLINGS IN PEAT-PEARLITE SUBSTRATES ENRICHED WITH ORGANIC AND MINERAL CONTROLLED-RELEASE FERTILISERS

V. E. ARTISHEVSKAYA^a, A. Yu. SHASHKO^a, A. A. OVSEY^b, R. S. NEDELKO^a,
U. Yu. BANDARENKA^a, M. A. CHARNYSH^a, P. V. HRYVUSEVICH^a, O. G. YAKOVETS^a,
N. A. LAMAN^c, A. I. SOKOLIK^a, V. V. DEMIDCHIK^c

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bRepublican Forest Selection and Seed Centre, P-1 Highway, 17th kilometre,
Valkovichy 223049, Shchomyslicki village council, Minsk District, Belarus

^cV. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus,
27 Akademichnaja Street, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: V. V. Demidchik (demidchik@botany.by)

Abstract. In the presented work, the effect of different compositions of peat-pearlite substrates on the growth of *Pinus sylvestris* L. (Scots pine) and *Picea abies* (L.) H. Karst. (European spruce) seedlings were tested in standard containers (limited space for root system development) during one growing season. As components of soil substrates, long-lasting encapsulated controlled-release fertilisers (CRF) «Basacote» and «Top Substra», water-soluble specialised fertiliser for peat enrichment «PG mix», zeolite-based CRF «ZION», organic fertilisers «Organicum» (dry sterilised chicken manure) and «Biohumus» (vermiculture-based compost), as well as rothenstone (tripoli), vermiculite and flax shives were examined. It was demonstrated that at the early stage of growth (42 days), European spruce seedlings showed a faster increase in shoot length on substrates with the organic additive «Organicum» (chicken manure). At the later stages of the tested vegetation period (56–91 days), European spruce seedlings showed the most intensive growth on substrates with the addition of CRF «Basacote» (capsules containing macro- and microelements covered with an inorganic polymer membrane). For Scots pine, the best growth rates both in early and late vegetation periods (42–91 days) were found on substrates containing a specialised fertiliser for peat enrichment «PG mix» (without liming; pH 2.7–3.2). The introduction of such fertilisers, as «Top Substra», «ZION» and «Biohumus» into peat substrates had a smaller effect on stimulation of growth as compared to fertilisers «Basacote», «Organicum» and «PG mix». This study also found the correlations between the saturation of the soil electrolyte content (electrical conductivity test), pH and growth parameters; the digital phenotyping of young spruce and pine plants was also carried out.

Keywords: soil substrate; controlled-release fertiliser; Scots pine; European spruce; conifer seedlings; growth and development of higher plants.

Введение

Получение высококачественного посадочного материала лесобразующих древесных растений – важная задача прикладной физиологии растений, лесоводства, декоративного питомниководства и биотехнологии [1–3]. В настоящее время происходит переход от классических методов выращивания семян древесных растений в открытом грунте к их культивированию с закрытой корневой системой (ЗКС), т. е. в кассетах, контейнерах и горшках ограниченного объема. На сегодняшний день в системе Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь функционируют 79 постоянных лесных питомников и высокотехнологичных тепличных комплексов общей площадью 1,34 тыс. га. В 2024 г. в лесных питомниках Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь было выращено 371,85 млн стандартных семян и саженцев древесных растений для лесокультурного производства и озеленения, в том числе более 35,4 млн семян и саженцев с ЗКС. Данное количество посадочного материала может обеспечить создание новых лесных насаждений на площади от 8,5 до 9,5 тыс. га в зависимости от типов условий местопрорастания и схемы смешения растений¹. В последние годы значительно возросла доля древесных растений с ЗКС, производимых для целей декоративного озеленения. Кроме того, практически все завозимые из-за рубежа древесные растения (а это большая часть рынка) имеют ЗКС. В связи с этим исследование физиологических процессов у древесных растений, выращенных с ЗКС, представляет значительный интерес. Актуальным вопросом является установление особенностей роста растений с ЗКС на разных по составу почвенных субстратах в культивационных сосудах различного объема и формы, а также исследование влияния отдельных компонентов субстратов на физиологическое состояние молодых растений.

Среди лесобразующих видов древесных растений Беларуси центральное место занимают *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная) и *Picea abies* (L.) H. Karst. (ель европейская) [4; 5]: к ним относятся подавляющее большинство растений, выращиваемых в тепличных комплексах страны. Оба вида хорошо изучены в плане физиологии и генетики, для них детально проработаны подходы к селекции и биотехнологические приемы выращивания и размножения [6]. Важно отметить, что *Pinus sylvestris* и *Picea abies* также являются ценными декоративными видами, используемыми в том числе и в декоративном питомниководстве. Данные растения в природной среде и в питомниках размножаются как вегетативно, так и семенами. Для лесовоспроизводства применяется в основном семенное размножение благодаря высокому коэффициенту пропагации и пользе для генетической вариабельности. В то же время в декоративном питомниководстве для сохранения ценных фенотипических признаков чаще используется вегетативное размножение главным образом неодревесневевшими черенками. Размножение *in vitro* для *Pinus sylvestris* и *Picea abies* на практике применяется редко, так как оба вида отличаются высокой редандностью к культивированию в асептических условиях и гелевых средах (испытывают стресс и медленно растут).

Как указано выше, в последние годы увеличивается доля растений, выращиваемых с ЗКС, что относится как к семенному, так и к вегетативному размножению. Хотя выращивание древесных растений с ЗКС имеет ряд недостатков (неразвитость корневой системы, замедленный рост после пересадки, низкая стрессоустойчивость), оно более удобно для хранения, перемещения, транспортировки и продажи растений, чем классические методы, использующие семена с открытой корневой системой. Среди преимуществ ЗКС можно выделить экономию воды, удобрений и субстратов, лучший контроль физико-химических параметров субстрата и среды, а также более высокий уровень стандартизации продукции и производственных процедур. При проведении научных исследований культивирование растений с ЗКС облегчает подбор и стандартизацию условий, что необходимо для фенотипического отбора, а также использования подходов маркерсопутствующей селекции [7; 8].

Центральной задачей при выращивании растений в ограниченном объеме субстрата является разработка композиций, обеспечивающих максимально быстрое укоренение молодых растений, их высокую скорость роста и жизнеспособность [9; 10]. В качестве основного компонента субстратов, используемых для выращивания хвойных растений, традиционно применяется верховой торф с высоким содержанием неразложившихся растительных остатков [11]. Верховой торф выполняет функцию механического, ионообменного и влагоудерживающего носителя. Он содержит гуминовые кислоты и фульвокислоты – соединения, обладающие мощнейшими ионообменными свойствами и являющиеся основой для формирования почвенных частиц. Природный уровень элементов минерального питания в торфе невелик, но благодаря пористой структуре и наличию гуминовых веществ торф способен удерживать воду и большое количество макро- и микроэлементов при их дополнительном включении [12]. В связи с этим торф часто обогащается макро- и микроэлементами, которые обычно вносятся в неорганической форме, реже в составе органических удобрений. Главным образом применяются минеральные соли в виде мелкодисперсных

¹Итоги проведения мероприятий по воспроизводству лесов в 2024 году и задачи на 2025 год : постановление коллегии М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 30 дек. 2024 г. Минск : Минлесхоз, 2024. 14 с.

сбалансированных смесей. В последние годы был разработан ряд специализированных смесей для обогащения торфа, способных равномерно (за счет мелкодисперсной формы и относительно синхронного растворения солей) вводить элементы минерального питания в капиллярно-пористую ионообменную матрицу торфа [13]. Одними из наиболее массово используемых во всем мире удобрений такого типа являются смеси компании *Yara* (Норвегия), в особенности специализированные удобрения серии «Yara PG mix». Данные удобрения нашли широкое применение в питомниках древесных растений Беларуси и других стран СНГ.

В качестве добавок для обогащения торфа потенциально могут использоваться органические удобрения, в частности различные виды гумуса, например биогумус, получаемый из компоста при помощи вермикультуры, и высушенный куриный помет [14]. Применение органических удобрений представляется перспективным ввиду их потенциально пролонгированного действия, что важно для длительного культивирования растений с ЗКС. Немаловажным также является факт устойчивого восполнения данного биоресурса. На сегодняшний день значительный интерес имеет тестирование стандартизированных коммерческих гумуссодержащих продуктов, представленных на рынке Беларуси и других стран СНГ, таких как продукт «Биогумус» (ОДО «Пиклайф», Беларусь), производимый при переработке отходов животноводства в вермикультуре дождевого навозного червя, и биопрепарата на основе высушенного и простерилизованного куриного помета «Organicum» (ЗАО «Регион Био Девелопмент», Беларусь). Эффективность данных препаратов в качестве ростостимулирующей добавки к верховому торфу была протестирована в настоящей работе.

В последние годы в композиции субстратов часто вводятся такие добавки, как льняная костра, трепел, лигнин, диатомит, древесные опилки, керамзит, кокосовая стружка, крупная лузга и др. [15–18]. Эти недорогие агенты, как предполагается, могут улучшить структуру, аэрацию и (или) ионообменные свойства субстрата, а также выступить источником некоторых минеральных элементов (Si, Fe и Se). Тем не менее научное обоснование использования данных добавок, как и доказательство их эффективности при выращивании древесных растений, остается недостаточно обоснованным, в связи с чем их применение требует более глубокого исследования.

Одним из эффективных подходов, стимулирующих рост растений при контейнерном выращивании посадочного материала, является использование удобрений с замедленным высвобождением элементов, т. е. удобрений, обладающих способностью постепенного выделения в почвенный раствор минеральных элементов на протяжении длительного времени (до 2 лет), что достигается за счет наличия полупроницаемой органической или неорганической мембраны, медленного растворения матричного материала гранулы либо повышенной ионообменной емкости используемого функционального агента [19]. В мире такие удобрения также классифицируют как удобрения с контролируемым высвобождением (*controlled-release fertilisers*, CRF). Среди данных удобрений, используемых для культивирования древесных растений, в последнее время наиболее широко применяются удобрения «Basacote® Plus 6M 16-8-12(+2+ME)» (капсулы покрыты неорганической мембраной, обеспечивающей замедленное растворение и выход элементов в почвенный раствор) и «Top Substra 12-12-17(+2)» (70 % капсул покрыты мембраной; 30 % минералов представлены в неорганической водорастворимой форме и служат для быстрой «зарядки и обогащения» торфа или других материалов) компании *Compo Expert* (Германия). Также недавно было разработано удобрение «ЦИОН» (ООО «Мир чистой воды», Россия), согласно информации производителя являющееся эффективным удобрением пролонгированного действия на основе модифицированного минерала цеолита, обогащенного элементами минерального питания.

Целью данной работы был анализ укоренения и роста сеянцев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* в торфяно-перлитных субстратах, содержащих удобрения с контролируемым высвобождением элементов, водорастворимые специализированные минеральные удобрения для торфа, цеолитные удобрения пролонгированного действия, биогумус, сухой куриный помет, трепел, вермикулит и льняную костру.

Материалы и методы исследования

В работе использовались семена *Pinus sylvestris* и *Picea abies*, заготовленные на лесосеменных плантациях Глубокского опытного лесхоза в зимний период 2020 г. Переработка сырья, очистка и доочистка семян осуществлялись в Республиканском лесном селекционно-семеноводческом центре. Лабораторная всхожесть семян составила 97 % для сосны обыкновенной и 95 % для ели европейской, что соответствовало 1-му классу качества.

Исследовались субстраты, приготовленные на основе верхового торфа, произведенного ОАО «Торфопредприятие «Глинка»» и имеющего массовую долю влаги 40–60 %, степень разложения не более 25 %, размер фракции до 15 мм, засоренность не более 1 % и кислотность в диапазоне pH 2,8–3,5. В данный торфяной «носитель» вводился перлит (10 %) и тестируемые добавки (табл. 1). Сокращенные названия протестированных субстратов приведены в табл. 1.

Характеристики протестированных почвенных субстратов

Characteristics of tested soil substrates

№ п/п	Сокращенное название субстрата	Наименование и производитель тестируемых компонентов	Состав субстрата	Особенности
1	Top Substra	Top Substra (<i>Compro Expert</i> , Германия), трепел (ОДО «Трепел-М», Беларусь), вермикулит (ООО «Вермикулитная компания», Беларусь)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), минеральное удобрение пролонгированного действия «Top Substra 12-12-17(+2)» (2 кг на 1 м ³ субстрата), трепел (15 кг на 1 м ³ субстрата), вермикулит (6 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный минеральным удобрением пролонгированного действия, содержащим N, P, K, Mg, S, B, Fe, Zn (без Ca*, Cl и Na), с добавлением трепела и вермикулита для улучшения физических свойств субстрата
2	Basacote	Basacote® Plus 6M (<i>Compro Expert</i> , Германия), трепел (ОДО «Трепел-М», Беларусь), вермикулит (ООО «Вермикулитная компания», Беларусь)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), минеральное удобрение пролонгированного действия «Basacote® Plus 6M 16-8-12(+2+ME)» (2,5 кг на 1 м ³ субстрата), трепел (15 кг на 1 м ³ субстрата), вермикулит (6 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный комплексным минеральным удобрением пролонгированного действия, содержащим N, P, K, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn (без Cl и Na), с добавлением трепела и вермикулита для улучшения физических свойств субстрата
3	ЦИОН	ЦИОН (ООО «Мир чистой воды» Россия), вермикулит (ООО «Вермикулитная компания», Беларусь)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), питательная добавка для хвойных растений «ЦИОН» (4,4 кг на 1 м ³ субстрата), вермикулит (6 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный минеральной добавкой на основе цеолита, содержащей N, P, K, Mg, S (без Ca*, Cl и Na), с добавлением вермикулита для улучшения физических свойств субстрата
4	Биогумус	Биогумус (ОДО «Пиклайф», Беларусь), костра (ОАО «Пружанский льнозавод», Беларусь)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), органическое удобрение на основе вермикулиты «Биогумус» (22 кг на 1 м ³ субстрата), трепел (15 кг на 1 м ³ субстрата), костра (15 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный удобрением на основе вермикулиты, полученным при переработке отходов животноводства с помощью дождевого навозного червя; для улучшения физических свойств субстрата в него добавлены трепел и льняная костра
5	Organicum	Organicum (ЗАО «Регион Био Девелопмент», Беларусь), трепел (ОДО «Трепел-М», Беларусь), костра (ОАО «Пружанский льнозавод», Беларусь)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), удобрение на основе куриного помета «Organicum» (9 кг на 1 м ³ субстрата), трепел (15 кг на 1 м ³ субстрата), костра (15 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный удобрением на основе куриного помета, содержащим N, P, K, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn и аминокислоты; для улучшения физических свойств субстрата в него добавлены трепел и льняная костра
6	PG mix 700	PG mix (<i>Yara</i> , Норвегия)	Нераскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), минеральное удобрение с микроэлементами «PG mix N-P-K+Mg+S/12-14-24+2+14+micro» (0,7 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 2,5–3,5, обогащенный N, P, K, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo (без Ca*, Cl и Na)
7	PG mix 1000, раскисл.	PG mix (<i>Yara</i> , Норвегия)	Раскисленный верховой торф (90 %), перлит (10 %; фракция 1,25–5,00 мм), где снижение кислотности проводилось за счет внесения доломитовой муки из расчета 4 кг на 1 м ³ субстрата, минеральное удобрение с микроэлементами «PG mix 12-14-24+2+14+micro» (1 кг на 1 м ³ субстрата)	Торфяно-перлитный субстрат с pH 4,5–4,7, обогащенный комплексным минеральным удобрением пролонгированного действия, содержащим N, P, K, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn (без Cl и Na)

*Снабжение калием осуществлялось посредством полива водой из скважины, содержащей высокий уровень Ca²⁺.

В качестве емкостей для выращивания сеянцев использовались кассеты «Плантек 64Ф» (*BCC Plant the Planet*, Швеция). Внешние габариты кассеты 38,5 см (длина), 38,5 см (ширина), 7,3 см (высота); размер одной ячейки 4,6 см (длина), 4,6 см (ширина), 7,3 см (высота); объем ячейки 115 см³; количество ячеек в кассете 64 шт.; плотность сеянцев 432 шт. на 1 м². Каждым вариантом тестируемого субстрата заполнялось три кассеты, т. е. 192 ячейки. Для высева семян по центру каждой ячейки в субстрате подготавливалась посевная лунка глубиной примерно 1 см. Перед высевом семена сосны и ели протравливались фунгицидом «Виал-ТТ» (ООО «ВалдисАгро», Россия). В каждую ячейку высевалось по два семени. Поверхность субстратов мульчировалась агроперлитом для предотвращения чрезмерного испарения влаги. Отбор проб субстратов для лабораторных испытаний проводился согласно ГОСТ 5396-77². После посева кассеты устанавливались на подставки, что позволяло избежать срастания корней и обеспечивало так называемую воздушную подрезку (постепенное отмирание выступающих из культивационных емкостей частей корней). Далее кассеты переносились в теплицы с полиэтиленовым покрытием, оборудованные рамповым поливом и автоматической системой поддержания физико-химических условий среды (климат-контроль). Сеянцы выращивались в температурном диапазоне от 20 до 24 °С. Основным полив проводился в первой половине дня. При пересыхании поверхности субстрата осуществлялся кратковременный дополнительный полив. Растения выращивались в течение одного вегетационного сезона, в процессе выращивания отбирались пробы субстрата и образцы тканей растений для анализа.

Показатель кислотности (pH) и электропроводность водной вытяжки почвенного субстрата измерялись при помощи стационарного pH-метра Orion Star A211 (*Thermo Fisher Scientific*, США) и кондуктометра HI 2300 EC/TDS/NaCl Meter (*Hanna Instruments*, США). Общая кислотность субстрата определялась по вытяжке в растворе 1 моль/л KCl, электропроводность – путем уравнивания субстрата с дистиллированной водой и последующего измерения проводимости полученной смеси.

Анализ морфометрических показателей растений выполнялся с использованием подходов цифрового фенотипирования при помощи цифровых SLR-камер Nikon 3000D с 3D-штативами и равномерным освещением (*Nikon Corporation*, Япония). В результате были получены изображения растущих растений в вертикальной проекции. Далее при помощи программы *ImageJ* выделялась и анализировалась площадь зеленой части растения. Таким же образом измерялись и анализировались характеристики листовых пластинок (хвои). Полученные данные были представлены в виде зависимостей площади зеленой части растения в вертикальной проекции и длины первичного побега (стволика) от варианта тестируемого субстрата.

Экспериментальная часть работы проводилась на базе Республиканского лесного селекционно-семеноводческого центра.

Результаты и их обсуждение

В представленной работе анализировалась длина первичного побега (стволика), развивающегося непосредственно из гипокотилия (рис. 1). Согласно литературным данным длина первичного побега является часто используемым параметром для оценки роста сеянцев сосны и ели [20]. Измерения производились на 42, 56, 70 и 91-е сутки с момента высева семян и начала культивирования растений на субстратах различного состава (см. табл. 1).

Первое измерение длины стволика выполнялось на 42-е сутки с момента высева семян в кассеты. На данном этапе первичные побеги растений сосны обыкновенной были на 20–50 % длиннее, чем первичные побеги растений ели европейской, во всех вариантах ($p < 0,001$, тест ANOVA). Наибольший прирост длины надземной части сеянцев ели европейской на 42-е сутки наблюдался при использовании субстрата «Organicum», содержащего в качестве тестируемого компонента куриный помет (см. рис. 1, а). Например, первичные побеги сеянцев ели европейской, которые выращивались на субстрате «Organicum», достигали приблизительно на 30 % большей длины по сравнению с первичными побегами сеянцев ели европейской, культивируемых на субстрате «PG mix 700». Также высокую эффективность по поддержанию роста ели на 42-е сутки продемонстрировал субстрат «Биогумус», содержащий гумус из вермикултуры (см. табл. 1). Он лишь незначительно уступал субстрату «Organicum». Для сосны обыкновенной наибольшая длина первичного побега на 42-е сутки была зарегистрирована у растений, культивируемых на субстратах «PG mix 700» и «PG mix 1000, раскисл.». Различия в приросте первичного побега на 42-е сутки для сосны были менее выраженными, чем для ели.

Следующее измерение длины первичного побега было произведено на 56-е сутки. Так же, как и при измерении, проведенном на 42-е сутки, побеги растений сосны обыкновенной имели большую длину, чем побеги растений ели европейской, при сравнении этого показателя для одних и тех же субстратов

²Торф. Методы отбора проб : ГОСТ 5396-77. Введ. 01.01.1979. М. : Изд-во стандартов, 1977. 5, [5] с.

($p < 0,001$, ANOVA). Максимальный прирост стволика для сеянцев ели европейской был зарегистрирован у растений, культивируемых на субстрате, содержащем удобрение пролонгированного действия «Basacote» (см. рис. 1, б). Длина первичных побегов сеянцев ели, выращенных на данном субстрате, была примерно на 10 % больше ($p < 0,001$, ANOVA), чем у сеянцев, выращенных на субстрате «Organicum» (второй по эффективности субстрат при 56-суточном культивировании), и на 35–40 % больше, чем у сеянцев, выращенных на субстрате «Top Substra» (наименее эффективный субстрат для ели). Высокую эффективность для ели на 56-е сутки также показал субстрат «Биогумус». Как и в случае 42-суточного культивирования, он незначительно уступал субстрату «Organicum». Для сосны обыкновенной наиболее высокие показатели по стимуляции роста первичного побега на 56-е сутки наблюдались при использовании субстратов «PG mix 700», «ЦИОН» и «Basacote». Так же, как и при измерении, проведенном на 42-е сутки, наименее эффективным субстратом для сосны был субстрат «Top Substra».

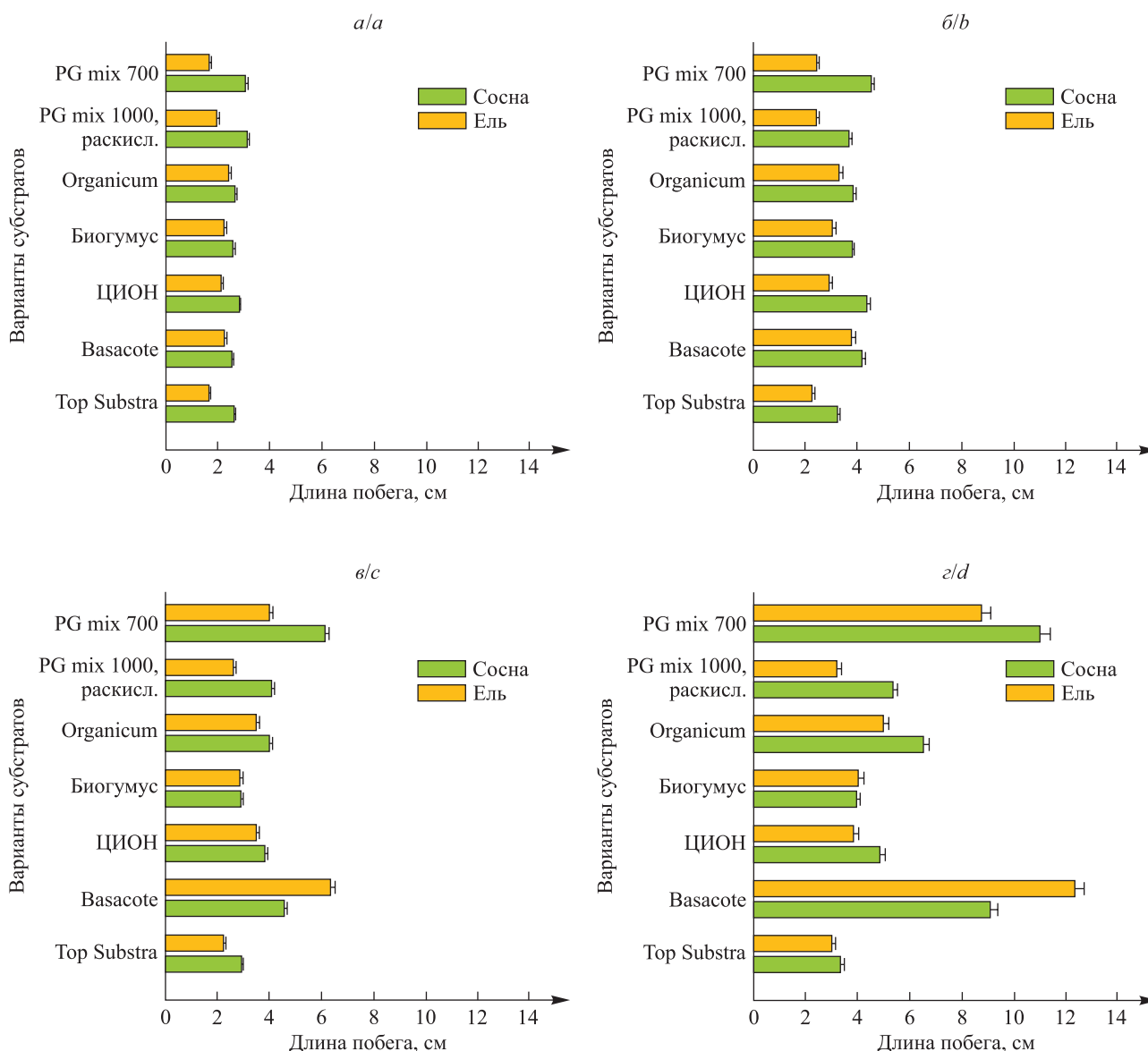


Рис. 1. Длина первичного побега (стволика) сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской при культивировании на различных субстратах в течение 42 сут (а), 56 сут (б), 70 сут (в) и 91 сут (г). По вертикальной оси указаны краткие названия субстратов, их составы см. в табл. 1. Данные представлены в виде средних значений (среднее значение $\pm$ ошибка средней величины; $n = 192$). Информация о достоверности отличий (ANOVA) приведена в тексте статьи

Fig. 1. Shoot length of seedlings of Scots pine and European spruce cultivated in different substrates during 42 days (a), 56 days (b), 70 days (c) and 91 days (d). The short names of the substrates are indicated by the vertical axis, their compositions see in table 1. The data are presented as mean (mean $\pm$ standard error; $n = 192$). Statistical significance coefficients (ANOVA) are provided in the text

На 70-е сутки выращивания первичные побеги сеянцев ели европейской для большинства субстратов существенно сократили отличие по длине от побегов сеянцев сосны обыкновенной, а для некоторых субстратов (субстрат «Basacote») значительно (на 25–26 %; $p < 0,0001$, ANOVA) опередили сеянцы сосны в росте (см. рис. 1, в). На 70-е сутки первичные побеги растений ели, выращенных на субстратах «PG mix 700», «Organicum» и «ЦИОН», незначительно отличались по длине друг от друга, но при этом на 40–45 % уступали по длине растениям, выращенным на наиболее эффективном из протестированных субстратов – «Basacote» ($p < 0,0001$, ANOVA). Наименьший прирост на 70-е сутки для ели отмечался у сеянцев, культивируемых на субстратах «Top Substra», «PG mix 1000, раскисл.» и «Биогумус». Для сосны обыкновенной наилучший результат по ростовым показателям растений продемонстрировал субстрат «PG mix 700», опередив субстрат «Basacote» примерно на 25 % ($p < 0,0001$, ANOVA). Субстраты «Organicum», «ЦИОН» и «PG mix 1000, раскисл.» были примерно на 15 % менее эффективными, чем субстрат «Basacote». Наименьшую эффективность на 70-е сутки для сосны показали субстраты «Top Substra» и «Биогумус». Стволики растений сосны, которые росли на данных субстратах, были примерно в 2 раза короче, чем стволики растений, выращенных на субстрате «PG mix 700».

Последнее снятие ростовых показателей сеянцев проводилось на 91-е сутки. В этой точке измерений субстраты «PG mix 700» и «Basacote» показали существенное отличие от других протестированных субстратов. Первичные побеги сеянцев ели европейской, которые выращивались на субстрате «Basacote», были на 25 % длиннее, чем первичные побеги растений, культивируемых на субстрате «PG mix 700» (второй по эффективности субстрат для ели), и как минимум в 2–3 раза превосходили по длине первичные побеги растений, культивируемых на других субстратах. Для сосны обыкновенной наиболее эффективным на 91-е сутки был субстрат «PG mix 700». Первичные побеги сеянцев, выращенных на данном субстрате, на 20 % опережали по скорости роста первичные побеги сеянцев, которые росли на субстрате «Basacote» (второй по эффективности субстрат для сосны), на 30 % – первичные побеги сеянцев, которые росли на субстрате «Organicum», и на 50 % – первичные побеги сеянцев, которые росли на субстрате «PG mix 1000, раскисл.». Наименьшая длина первичных побегов для сосны была зарегистрирована у растений, выращенных на субстрате «Top Substra». Она была в 3 раза меньше, чем у растений, выращенных на субстрате «PG mix 700».

Согласно мнению специалистов-практиков и литературным данным развитие надземной части сеянцев является важным показателем, влияющим на дальнейшее выживание и рост молодых растений [9]. В представленной работе с использованием вертикальной цифровой съемки был проведен анализ надземной части сеянцев ели европейской и сосны обыкновенной, которые культивировались на различных субстратах (рис. 2). Регистрировались различия в площади зеленой части (хвои) растений на изображениях, полученных в вертикальной проекции (стационарная съемка сверху на расстоянии 0,5 м) на 91-е сутки культивирования. Площадь рассчитывалась в полуавтоматическом режиме с использованием программы *ImageJ*.

Исходя из данных, приведенных на рис. 2, площадь хвои у растений ели европейской была значительно меньше, чем у растений сосны обыкновенной. Для субстрата «PG mix 700» на 91-е сутки выращивания оцененная площадь хвои у сеянцев сосны была в 7–8 раз больше таковой у сеянцев ели. Единственным исключением являлся субстрат, содержащий капсульно-мембранное удобрение пролонгированного действия «Basacote», для которого разница между площадью хвои в вертикальной проекции у растений сосны и ели была небольшой (лишь около 30 %). Важно отметить, что при выращивании сеянцев ели европейской на субстрате «PG mix 700» при относительно слабом увеличении площади хвои растения отмечался сильный рост первичного побега в длину, превосходящий его рост на субстрате «Basacote» (см. рис. 1). В то же время как длина первичного побега, так и площадь хвои растений сосны обыкновенной, культивируемых на субстрате «PG mix 700», увеличивались очень интенсивно. Скорость роста сеянцев сосны на данном субстрате не уступала значениям, полученным для субстрата «Basacote». Наименее эффективным субстратом по отношению к увеличению площади хвои растения являлся субстрат «Биогумус» (см. рис. 2). Невысокие показатели роста сеянцев ели европейской были продемонстрированы при их выращивании на субстратах «PG mix 1000, раскисл.», «Organicum» и «ЦИОН» (см. рис. 2), при этом субстраты «ЦИОН» и «Organicum» оказались более эффективными для культивирования сеянцев сосны обыкновенной. Субстрат «Top Substra» показал относительно высокую эффективность по стимуляции роста хвои у сеянцев ели и более низкую эффективность по стимуляции роста хвои у сеянцев сосны. В то же время при выращивании сеянцев на данном субстрате наблюдалось слабое удлинение стволиков у обоих протестированных видов хвойных растений (см. рис. 1). Следует отметить, что использованные методы не отражают в полной мере влияния субстрата на рост хвои, однако они показывают возможность быстрой оценки физиологического состояния растений и их потенциального укоренения с применением доступных цифровых подходов.

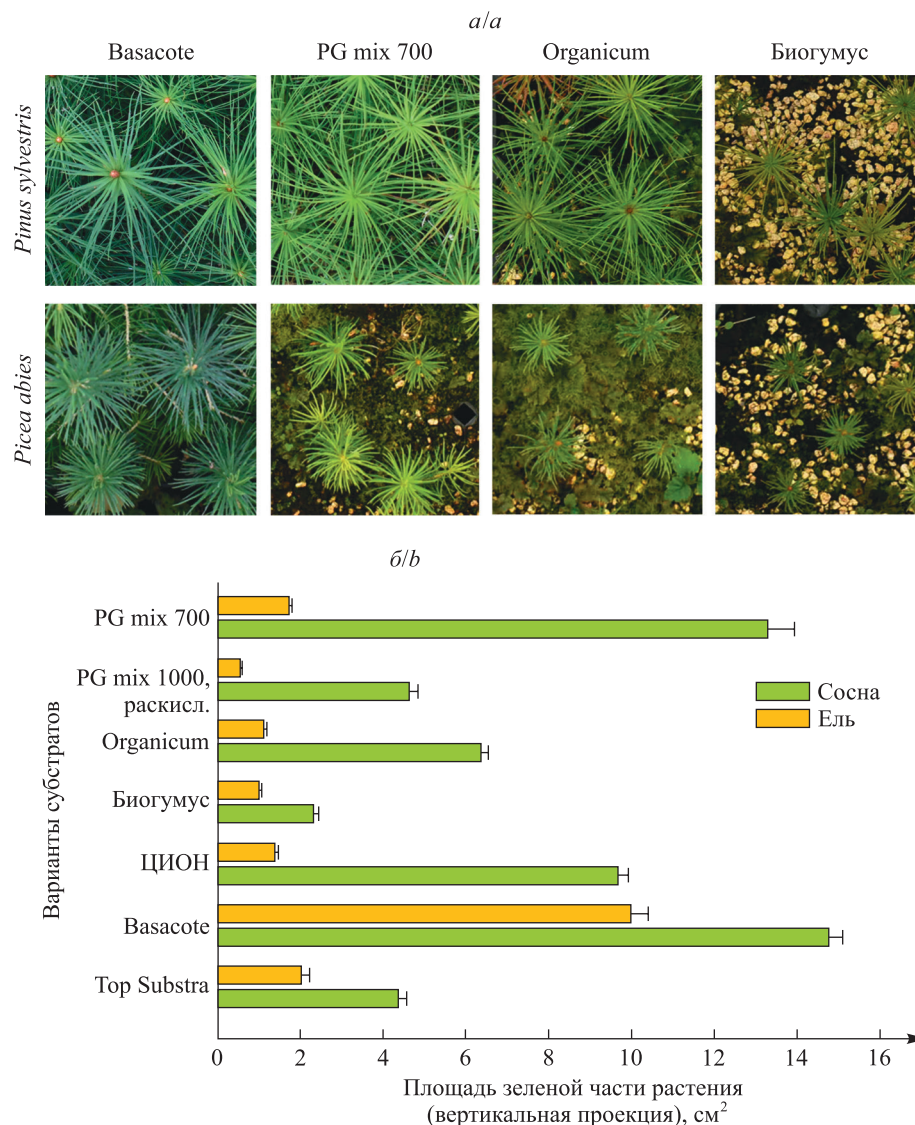


Рис. 2. Площадь зеленой части (хвои) сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской при культивировании на различных субстратах в течение 91 сут.

По вертикальной оси указаны краткие названия субстратов, их составы см. в табл. 1. Данные представлены в виде средних значений (среднее значение $\pm$ ошибка средней величины; $n = 192$).

Измерения площади зеленой части растений в вертикальной проекции производились при помощи программы *ImageJ*

Fig. 2. Surface of green parts (needles) of seedlings of Scots pine and European spruce cultivated in different substrates during 91 days. The short names of the substrates are indicated by the vertical axis, their compositions see in table 1.

The data are presented as mean (mean $\pm$ standard error; $n = 192$).

Measurements of green part of the plants in vertical direction was carried out using *ImageJ* software

В работе также был проведен анализ воды из скважины, использованной для полива. Как показали его результаты, вода имела средний уровень минерализации (353 мг/л), высокое содержание кальция (57,6 мг/л) и карбоната (247,1 мг/л), а также высокое значение pH (8,1), что является типичным для воды, используемой в Минском районе для полива питомников. Постоянный полив такой водой приводил к увеличению pH и обеспечивал растения Ca^{2+} (в связи с этим данный элемент не вводился с удобрениями или в виде подщелачивающего агента при раскислении торфяного субстрата). Известно, что уровень Ca^{2+} в питательном растворе должен составлять 1–10 ммоль/л для нормальной обеспеченности растения этим элементом [21]. Анализ изменения pH при культивировании сеянцев на всех протестированных субстратах выявил тенденцию к подщелачиванию среды (табл. 2). За 4 мес. наблюдений значения pH возрастали, в особенности на субстратах с добавлением органических удобрений, при этом для растений сосны обыкновенной эта тенденция проявлялась слабее. Для раскисленного субстрата значения pH (6,48 для ели и 6,79 для сосны) выходили за диапазон оптимальных значений для выращивания сеянцев

сосны (рН 4–5). Важно отметить, что стабильно низкий уровень рН наблюдался в субстратах «Basacote» и «PG mix 700», продемонстрировавших высокую эффективность по поддержанию роста сосны и ели (в субстрате «Basacote» величина рН составила 3,99 для сосны и 3,86 для ели, в субстрате «PG mix 700» – 3,31 для сосны и 3,35 для ели). Согласно литературным данным рН природных почв вблизи корневой системы сосны и ели значительно снижается по сравнению с рН на расстоянии 1 м и более от нее [22]. В непосредственной близости от корня рН составляет 3,1–3,5 для сосны и 3,3–3,7 для ели, повышаясь на 0,5–1,0 единицы на расстоянии 0,2–1,0 м от основного корня, т. е. в соответствии с литературными данными сосна демонстрирует несколько более высокую способность к подкислению почвенной среды, чем ель [22], что отмечено и в настоящей работе (см. табл. 2). Согласно ТУ ВУ 100061961.002-2015³ рекомендуемый уровень рН субстратов для выращивания семян сосны и ели составляет 2,8–3,5, что согласуется с данными о рН в прикорневой зоне этих растений [22]. Установленный в работе диапазон изменения рН при культивировании семян (см. табл. 2) указывает на то, что на 35-е сутки выращивания субстраты «Top Substra», «Basacote», «ЦИОН», «Биогумус» и «PG mix 700» демонстрировали поддержание оптимальных значений рН при поливе водой, вызывающей смещение рН в сторону более высоких значений. На 130-е сутки лишь субстраты «PG mix 700» (сосна и ель) и «ЦИОН» (только ель) демонстрировали рН в диапазоне, рекомендуемом действующими техническими условиями.

Проводимость (электропроводность) почвенного раствора отражает наличие растворенных минеральных элементов и является интегральным показателем ионно-минеральной обеспеченности субстрата и растущего растения. Наибольшие значения электропроводности почвенного раствора на старте опыта были у субстратов «Basacote», «PG mix 700» и «PG mix 1000, раскисл.», наименьшие – у субстрата «Top Substra» (см. табл. 2). На 35-е сутки по этому показателю лидировали субстраты «Basacote» и «PG mix 700», на 130-е сутки с большим отрывом лидировал субстрат «Basacote». В целом это отражает и успешность выращивания семян на данных субстратах: растения сосны и ели лучше росли именно на субстратах «Basacote» и «PG mix 700» (см. табл. 2).

Таблица 2

Уровень рН и электропроводность почвенного раствора протестированных субстратов

Table 2

Values of the pH and electrical conductivity of the soil solution of tested substrates

Сокращенное название субстрата	8 сут (без растений)	35 сут (сосна)	130 сут	
			сосна	ель
Уровень pH				
Top Substra	2,77	3,36	3,78	3,82
Basacote	3,04	3,32	3,99	3,86
ЦИОН	2,82	3,20	3,50	3,34
Биогумус	3,07	3,47	4,29	4,60
Organicum	3,04	4,08	4,09	5,40
PG mix 700	2,84	3,01	3,31	3,35
PG mix 1000, раскисл.	5,25	5,94	6,48	6,79
Электропроводность почвенного раствора, мкСм/м				
Top Substra	134,3	214,3	248,4	112,5
Basacote	655,4	1670,0	474,1	962,8
ЦИОН	128,8	156,9	97,02	139,7
Биогумус	182,6	261,1	136,8	114,9
Organicum	172,9	297,5	222,8	175,8
PG mix 700	907,7	1300,0	153,4	143,6
PG mix 1000, раскисл.	670,6	870,4	346,6	327,4

Примечание. Состав почвенных субстратов приведен в табл. 1.

³Субстраты торфяно-перлитные. Технические условия : ТУ ВУ 100061961.002-2015 / Респ. лесной селекц.-семеновод. центр. Минск : М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2015. 12 с.

Хорошо известно, что внесение удобрений может ускорить рост побегов и корней древесных растений, изменить стационарное содержание минеральных веществ в тканях и, следовательно, количество доступных запасов элементов минерального питания, тем самым позволяя ускорить рост растений после высадки, а также повысить их устойчивость к водному стрессу, низким температурам и болезням [23; 24]. Эти свойства имеют крайне важное значение для успешного выживания ювенильных укореняющихся растений в неблагоприятных условиях [25; 26]. Форма доставки питательных веществ может существенно влиять на развитие сеянцев лесообразующих видов. Применение водорастворимых «обогащающих» удобрений (фертигация) к торфяным субстратам является нормой в лесных питомниках [27]. Тем не менее внесение в субстрат твердых удобрений с контролируемым высвобождением элементов питания представляет собой более современную и эффективную альтернативу фертигации [28]. В последние 20–30 лет были проведены исследования эффективности введения в почвенный субстрат удобрений пролонгированного действия для ряда хвойных растений, включая различные виды сосны и ели [29; 30]. Они показали не только эффективность данных удобрений по сравнению с обычными удобрениями, но и их высокую экологичность, проявляющуюся в низкой утечке минеральных элементов в почву. Кроме того, было продемонстрировано, что удобрения с контролируемым высвобождением элементов, представляющие собой капсулы с одной мембраной, такие как удобрения «Osmocote» и «Basacote», не оказывают токсического воздействия на сами хвойные растения в случае их культивирования с ЗКС, когда ограниченный объем субстрата чрезмерно обогащается элементами в обычной быстрорастворимой форме [31]. Примечательно, что разные виды удобрений, содержащие несколько мембран или матрицу различной природы, удерживающую элементы, были менее эффективными, чем удобрения «Osmocote» и «Basacote» с однослойной мембраной. В представленной работе удобрение «Basacote» продемонстрировало высокую эффективность, опережая по ростовым показателям сеянцев другие удобрения. Интересно, что добавка «Basacote» обеспечивала эффективное поддержание pH на низком уровне даже при использовании воды с высоким содержанием кальция и карбоната.

Немаловажным является и тот факт, что продолжительность высвобождения питательных веществ для удобрений пролонгированного действия, адаптированных к лесным питомникам, может быть увеличена до 16–24 мес., за счет чего обеспечивается поступление питательных веществ в течение всего цикла выращивания лесных культур [32] и даже после их пересадки на плантации [27; 33]. В то же время фертигация водорастворимыми удобрениями типа «PG mix» для обогащения торфа при более продолжительных, чем 3–4 мес., периодах выращивания требует дополнительной подкормки минеральными смесями, например специализированным удобрением «Kristalon» (Yara, Нидерланды), содержащим микроэлементы. В связи с этим можно заключить, что удобрения с контролируемым высвобождением элементов обладают более значительными преимуществами, чем большинство известных типов удобрений. Однако удобрения с контролируемым высвобождением элементов имеют высокую стоимость и являются менее выгодными для массового производства растений в питомниках, чем водорастворимые смеси типа «PG mix» или их аналоги. В целом полученные данные указывают на то, что, несмотря на высокую эффективность удобрений с контролируемым высвобождением элементов («Basacote»), при цене, в 3–4 раза превышающей цену водорастворимых удобрений, их использование пока может быть невыгодным для многих питомников.

Органические добавки в субстраты для выращивания сосны, ели и других лесообразующих древесных растений ранее обычно тестировались без сравнения их эффективности с эффективностью удобрений пролонгированного действия [34]. Следует отметить, что органические добавки в виде гуано, городских сточных вод, компостов и измельченных растительных остатков практически никогда не показывали большей эффективности, чем обычные быстрорастворимые удобрения, хотя и отличались значительно более высокой экологичностью и возможностью использования в органическом земледелии [35]. В настоящей работе было продемонстрировано, что органическая добавка в виде высушенного и простерилизованного куриного помета («Organicum») была эффективной на ранних этапах роста растений, вероятно обеспечивая быструю «отдачу» некоторых минеральных веществ, таких как азот, либо являясь источником органических веществ, в частности аминокислот, органических кислот и других метаболитов, которые могут стимулировать рост растений на ранних этапах роста и развития. Удобрение «Биогумус» показало низкую эффективность в проведенном исследовании, однако оно не было токсичным для сеянцев и поддерживало определенный уровень роста растений и минерализации почвенного раствора. При сравнении роста сеянцев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* в течение 91 сут на субстратах, содержащих удобрения «Organicum» и «Basacote», последний продукт продемонстрировал значительно большую эффективность, что, несомненно, связано с более мощным и стабильным выделением питательных минеральных элементов (положительная корреляция с электропроводностью почвенного раствора).

В работе в качестве основы субстратов использовался фрезерный верховой торф с pH 2,7–3,5. Торф доступен с экономической и удобен с практической точки зрения, так как способен впитывать и удерживать воду и минеральные вещества. Он относится к гетеропористым системам (неоднородно пористым

веществам). Твердая составляющая торфа имеет волокнистую структуру, которая состоит из разложившихся остатков растений и агрегатов органических и органоминеральных комплексов [12]. Важнейшими органическими компонентами торфа являются гуминовые кислоты, обладающие значительной хелатирующей способностью и ионообменной емкостью [12]. Пористость и высокая ионообменная емкость по сути превращают торф в уникальный природный ионообменный субстрат с пролонгированным выделением минеральных элементов, который может быть легко обогащен минеральными веществами. Удобрение «PG mix», специально разработанное компанией *Yara* для минерального обогащения торфа, показало максимальную эффективность в представленной работе. Подобного рода минеральные смеси «экономичнее» удобрений пролонгированного действия типа «Basacote», отличающихся дорогостоящим процессом производства. В то же время субстрат с добавлением удобрения «Basacote» даже через 4 мес. демонстрировал очень высокую электропроводность почвенного раствора, т. е. был высокоэффективным для продолжительного выращивания сеянцев. В связи с этим дальнейшее развитие субстратов может идти путем смешения трех компонентов – удобрений «PG mix», «Basacote» и высушенного стерильного куриного помета. Эффективность таких смесей в будущем должна быть протестирована экспериментально.

Некоторые исследования (например, исследования, выполненные на томатах) показали незначительные изменения ростовых характеристик молодых растений, выращенных на чистом торфе и торфе с добавлением перлита, вермикомпоста, кокосовой стружки и леонардита [36], что указывает на низкую эффективность подобных добавок. Также пока отсутствуют достоверные литературные данные, подтверждающие высокую эффективность цеолитсодержащих удобрений. В целом это согласуется с полученными в настоящей работе результатами (отсутствие значительного улучшения роста под действием льняной костры, биогумуса, вермикулита и трепела).

Заключение

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. На ранних этапах роста (42 сут) сеянцы ели европейской демонстрировали наиболее значительный прирост на торфяно-перлитном субстрате, содержащем высушенный и простерилизованный куриный помет («Organicum»), что, возможно, связано с наличием в нем органических соединений и изначально высоким уровнем минеральных элементов. Сеянцы сосны обыкновенной, начиная с ранней фазы вегетации, лучше росли на субстратах с добавлением специализированного удобрения для обогащения торфа «PG mix» и удобрения пролонгированного действия «Basacote».

2. На более поздних этапах развития (56–91 сут) сеянцы ели европейской и сосны обыкновенной демонстрировали стабильно высокую динамику роста на субстратах с добавлением удобрения пролонгированного действия «Basacote» и специализированного удобрения для обогащения торфа «PG mix».

3. Сеянцы ели и сосны при культивировании в течение одного вегетационного сезона на субстратах «Биогумус», «ЦИОН» и «Top Substra» не проявляли высокой динамики роста и уступали по ростовым показателям сеянцам, культивируемым на субстратах «Basacote» и «PG mix 1000, раскисл.».

4. Субстратом, который превосходил по ростостимулирующей активности другие протестированные смеси в течение одного вегетационного сезона, являлся субстрат на основе торфа, перлита и водорастворимого удобрения «PG mix», представляющего собой минеральный состав, разработанный специально для обогащения торфа. Вероятно, за счет мелкодисперсной формы и особого соотношения минеральных солей микро- и макроэлементов данное удобрение наиболее эффективно насыщало капиллярно-пористую ионообменную матрицу торфа элементами, которые затем более эффективно поглощались корнями растений.

5. Эффективность субстратов положительно коррелировала с уровнем pH и электропроводностью почвенного раствора. Наибольшая скорость роста сеянцев наблюдалась в диапазоне pH 2,84–3,99 и при максимально высокой электропроводности почвенного раствора.

6. Раскисление торфа значительно снижало эффективность удобрения «PG mix». Использование для полива воды с высоким содержанием кальция и карбоната приводило к постепенному подщелачиванию протестированных почвенных субстратов, одновременно обеспечивая питательные потребности растений в кальции. В связи с этим на практике важно проводить мониторинг изменений pH почвенных субстратов при длительном культивировании хвойных растений в питомниках и учитывать влияние состава воды, используемой для полива плантаций.

Библиографические ссылки

1. Rodríguez SM, Ordás RJ, Alvarez JM. Conifer biotechnology: an overview. *Forests*. 2022;13(7):1061. DOI: 10.3390/f13071061.
2. Малашев ДГ, Дашкевич ЕА. Лесное хозяйство Республики Беларусь: современное состояние и стратегические направления развития. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2016;46:31–35. EDN: WZXJVV.

3. Лапицкая ОВ. Проблемы управления лесным хозяйством Беларуси с целью перспективной организации производства. *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. 2021;3:36–43. EDN: YSTCQB.
4. Лебедев ЕВ. Минеральное питание и биологическая продуктивность основных лесобразующих пород Беларуси в онтогенезе. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2013;3:23–29. EDN: RCCTVX.
5. Толкач ИВ, Кравченко ОВ, Ожич ОС, Таркан АВ, Ильчук МА. Закономерности изменчивости спектральных яркостей полога основных лесобразующих пород Беларуси на снимках сканера ADS100. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2017;2:43–49. EDN: YMIEBH.
6. Clyde D. Genomic insights into conifer evolution. *Nature Reviews Genetics*. 2022;23(3):136. DOI: 10.1038/s41576-022-00452-1.
7. Якимов НИ, Крук НК, Юренин АВ. Агротехника выращивания сеянцев сосны обыкновенной в условиях закрытого грунта. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2018;1:25–30. EDN: GKROCQ.
8. Якимов НИ, Крук НК, Юренин АВ. Оценка показателей роста саженцев ели европейской в уплотненной школе. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2017;1:50–54. EDN: ZWBYWZ.
9. Чернобровкина НП, Чернышенко ОВ, Егорова АВ, Зайцева МИ, Робонен ЕВ. Современные технологии выращивания посадочного материала хвойных пород и пути их совершенствования. *Лесной вестник*. 2016;20(6):6–14. EDN: WDWUWY.
10. Мухортов ДИ, Антропова АВ. Рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности слоения. В: Курбанов ЭА, Барталев СА, Чумаченко СИ, Хлюстов ВК, Воробьев ОН, Терехин ЭА и др., редакторы. *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. Выпуск 5*. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет; 2019. с. 42–53. DOI: 10.25686/2675.2019.5.58815.
11. Schmilewski G. The role of peat in assuring the quality of growing media. *Mires and Peat*. 2008;3:02. DOI: 10.19189/001c.128252.
12. Томсон АЭ, Наумова ГВ. *Торф и продукты его переработки*. Минск: Беларуская навука; 2009. 328 с.
13. Melo CA, de Oliveira LK, Goveia D, Fraceto LF, Rosa AH. Enrichment of tropical peat with micronutrients for agricultural applications: evaluation of adsorption and desorption processes. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2014;25(1):36–49. DOI: 10.5935/0103-5053.20130265.
14. Asadu CO, Ezema CA, Ekwueme BN, Onu CE, Onoh IM, Adejon T, et al. Enhanced efficiency fertilizers: overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environmental Pollution and Management*. 2024;1:32–48. DOI: 10.1016/j.epm.2024.07.002.
15. Зайцева МИ, Робонен ЕВ, Чернобровкина НП. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой. *Лесной вестник*. 2010;1:4–8. EDN: KYOKZB.
16. Мухортов ДИ, Романов ЕМ. Утилизация органических отходов при искусственном лесовосстановлении. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2013;3:20–35. EDN: RCKOMJ.
17. Lemaire F, Dartigues A, Rivière LM. Physical and chemical characteristics of a ligno-cellulosic material. In: Maher MJ, editor. *Symposium on substrates in horticulture other than soils in situ; 1988 September 12–16; Dublin, Ireland*. [S. l.]: International Society for Horticultural Science; 1989. p. 9–22 (Acta horticulturae; number 238). DOI: 10.17660/ActaHortic.1989.238.1.
18. Тебенюкова ДН, Лукина НВ, Воробьев РА, Орлова МА. Всхожесть семян и биометрические параметры сеянцев на субстратах из твердых отходов целлюлозно-бумажной промышленности. *Лесоведение*. 2014;6:31–40. EDN: TEUWUT.
19. Dovzhenko AP, Yapyntseva OA, Sinyashin KO, Doolotkeldieva T, Zairov RR. Recent progress in the development of encapsulated fertilizers for time-controlled release. *Heliyon*. 2024;10(15):e34895. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34895.
20. Редько ГИ, Огиевский ДВ, Наквасина ЕН, Романов ЕМ. *Биоэкологические основы выращивания сеянцев сосны и ели в питомниках*. Москва: Лесная промышленность; 1983. 64 с.
21. Demidchik V, Shabala S, Isayenkov S, Cuin TA, Pottosin I. Calcium transport across plant membranes: mechanisms and functions. *New Phytologist*. 2018;220(1):49–69. DOI: 10.1111/nph.15266.
22. Pallant E, Riha SJ. Surface soil acidification under red pine and Norway spruce. *Soil Science Society of America Journal*. 1990;54(4):1124–1130. DOI: 10.2136/sssaj1990.03615995005400040034x.
23. Grossnickle SC. *Ecophysiology of Northern spruce species: the performance of planted seedlings*. Ottawa: NRC Research Press; 2000. XII, 407 p.
24. Olier J, Planelles R, Segura ML, Artero F, Jacobs DF. Mineral nutrition and growth of containerized *Pinus halepensis* seedlings under controlled-release fertilizer. *Scientia Horticulturae*. 2004;103(1):113–129. DOI: 10.1016/j.scienta.2004.04.019.
25. Hakkarainen A, Kasanen E, Puttonen V. Foreign exchange risk management: evidence from Finland. *Managerial Finance*. 1997;23(7):25–44. DOI: 10.1108/eb018633.
26. Birchler T, Rose RW, Royo A, Pardos M. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 1998;7(1–2):109–121.
27. Timmer VR, Aidelbaum AS. *Manual for exponential nutrient loading of seedlings to improve outplanting performance on competitive forest sites*. Sault Ste. Marie: Great Lakes Forestry Centre; 1996. 29 p. Report No.: TR-25.
28. Priya E, Sarkar S, Maji PK. A review on slow-release fertilizer: nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024;12(4):113211. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113211.
29. Kaakinen S, Jolkonen A, Iivonen S, Vapaavuori E. Growth, allocation and tissue chemistry of *Picea abies* seedlings affected by nutrient supply during the second growing season. *Tree Physiology*. 2004;24(6):707–719. DOI: 10.1093/treephys/24.6.707.
30. Huett DO, Gogel BJ. Longevity and nitrogen, phosphorus, and potassium release patterns of polymer-coated controlled-release fertilizers at 30 °C and 40 °C. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2000;31(7–8):959–973. DOI: 10.1080/00103620009370490.
31. Fu Y, Olier JA, Li G, Wang J. Effect of controlled release fertilizer type and rate on mineral nutrients, non-structural carbohydrates, and field performance of Chinese pine container-grown seedlings. *Silva Fennica*. 2017;51(2):1607. DOI: 10.14214/sf.1607.
32. Benson RB. Fertilizer technology. In: Haase DL, Rose R, editors. *Forest seedling nutrition from the nursery to the field. Proceedings of the symposium; 1997 October 28–29; Corvallis, USA*. Corvallis: Nursery Technology Cooperative, Oregon State University; 1997. p. 5–9.

33. Reddell P, Gordon V, Hopkins MS. Ectomycorrhizas in *Eucalyptus tetrodonta* and *E. miniata* forest communities in tropical northern Australia and their role in the rehabilitation of these forests following mining. *Australian Journal of Botany*. 1999;47(6): 881–907. DOI: 10.1071/bt97126.
34. Landis TD, Dumroese RK. Using organic fertilizers in forest and native plant nurseries. In: Haase DL, Pinto JR, Riley LE, technical coordinators. *National proceedings: forest and conservation nursery associations – 2011*. Fort Collins: Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service; 2012. p. 45–52 (USDA Forest Service proceedings; RMRS-P-68).
35. Schuch UK, Mahato TR, Subramani J, Martin EC. Response of desert-adapted landscape trees to deficit irrigation. In: Snyder RL, Ortega-Farias S, Carlile WR, Raviv M, Nichols M, Clothier B, et al., editors. *29th International horticultural congress on horticulture: sustaining lives, livelihoods and landscapes (IHC2014). Proceedings of the International symposia on water, eco-efficiency and transformation of organic waste in horticultural production; 2014 August 17–22; Brisbane, Australia*. [S. l.]: International Society for Horticultural Science; 2016. p. 193–200 (Acta horticultrae; number 1112). DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1112.27.
36. Erdal İ, Aktaş H, Yaylacı C, Türkan ŞA, Aydın G, Hor Y. Effects of peat based substrate combinations on mineral nutrition, growth and yield of tomato. *Journal of Plant Nutrition*. 2024;47(1):30–48. DOI: 10.1080/01904167.2023.2265969.

Получена 04.03.2025 / исправлена 14.03.2025 / принята 14.03.2025.
Received 04.03.2025 / revised 14.03.2025 / accepted 14.03.2025.

Авторы:

Вероника Евгеньевна Артишевская – соискатель кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

Антонина Юрьевна Шашко – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Александр Анатольевич Овсей – заместитель директора, начальник научно-исследовательского отдела.

Рената Сергеевна Неделько – студентка биологического факультета. Научный руководитель – А. Ю. Шашко.

Владислав Юрьевич Бондаренко – старший преподаватель кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Мария Александровна Черныш – заведующий учебной лабораторией биоинженерии растений и ландшафтного дизайна биологического факультета.

Полина Вацлавовна Григусевич – кандидат биологических наук; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Оксана Геннадьевна Яковец – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Николай Афанасьевич Ламан – доктор биологических наук, академик НАН Беларуси, профессор; заведующий лабораторией роста и развития растений.

Анатолий Иосифович Соколик – кандидат биологических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Вадим Викторович Демидчик – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор; главный научный сотрудник лаборатории роста и развития растений.

Authors:

Veronika E. Artishevskaya, competitor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
artvic@bsu.by

Antonina Yu. Shashko, junior researcher at the laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
antonina.shashko@gmail.com

Alexander A. Ovsey, deputy director, head of the research department.
nauka@rlssc.by

Renata S. Nedelko, student at the faculty of biology.
prostorenata2001@gmail.com

Uladzislau Yu. Bandarenka, senior lecturer at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
bandarenka@bsu.by

Maryia A. Charnysh, head of the training laboratory of plant bioengineering and landscape design, faculty of biology.
charnyshma@bsu.by

Palina V. Hryvusevich, PhD (biology); associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
hryvusevich@bsu.by

Oksana G. Yakovets, PhD (biology), docent; head of the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
yakovets@inbox.ru

Nikolai A. Laman, doctor of science (biology), academician of the National Academy of Sciences of Belarus, full professor; head of the laboratory of plant growth and development.
nikolai.laman@gmail.com

Anatoliy I. Sokolik, PhD (biology), docent; head of the laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
sokolik@bsu.by

Vadim V. Demidchik, doctor of science (biology), corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, full professor; chief researcher at the laboratory of plant growth and development.
demidchik@botany.by