

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7143

УДК 630 * 319

Статья

Исследование почвенных субстратов на основе отходов деревообработки для выращивания лесных семян

Графова Елена Олеговна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), grafova.elena.karelia@gmail.com

Гаврилова Ольга Ивановна

доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), ogavril@petrsu.ru

Горбач Вячеслав Васильевич

доктор биологических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), gorbach@petrsu.ru

Получена: 12 марта 2023 / Принята: 16 мая 2023 / Опубликовано: 25 мая 2023

Аннотация: Низкая выживаемость семян, снижение плодородия, нарушения лесных почв приводят к недостаточному уровню лесовосстановления в России. Решением данной проблемы может служить подготовка питательных субстратов, компенсирующих дефицит плодородных почв и повышающих устойчивость искусственных лесных насаждений. Почвенные субстраты производились из отходов лесопромышленных предприятий Карелии методом компостирования с добавлением осадка сточных вод близлежащих предприятий ЖКХ. Оценка плодородных свойств субстратов проверялась на всхожести семян и определении скорости роста овса (*Avena sativa* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Субстраты сравнивались с торфосмесью заводского производства. Распределение вариант в выборках на соответствие нормальному закону проверяли критерием Шапиро — Уилка. Для статистической обработки данных использовали методы ресамплинга. Диапазон варьирования показателей оценивали посредством простого непараметрического бутстрепа, доверительные интервалы устанавливали методом процентилей. Для сравнений использовали рандомизационный тест MCR. Тренды изменчивости показателей во времени описывали логарифмическими моделями. Для производства субстратов были использованы опилки сосны (субстрат 1) и кора сосны (субстрат 2). Время производства субстратов отличалось: 5 месяцев и 1,5 года соответственно.

Полученные субстраты отличались по химическому составу и морфологической консистенции. В обоих субстратах содержание тяжёлых металлов, отсутствие патогенных микроорганизмов и паразитов соответствовало санитарным нормам, что определяло безопасность их применения. Всхожесть овса варьировала от 0 до 100 %. Длина растений в контроле не отличалась существенно от субстрата 2, но была значимо больше, чем в субстрате 1. Всхожесть семян сосны составила от 20 до 100 %, по числу проросших семян сеянцы значимо не различались, самый медленный рост сеянцев наблюдали в субстрате 1, самый быстрый — в субстрате 2. Средние скорости роста растений в торфе и субстрате 2 значимо не различались. Таким образом, установлено отсутствие существенных различий, испытываемых субстратов для прорастания семян. Результаты исследований свидетельствуют о том, что плодородные свойства полученных субстратов значительно не отличаются от торфосмеси, подготовленной в заводских условиях. Субстраты, полученные при свежем и длительном сроках хранения древесных отходов, можно использовать для выращивания сеянцев в питомниках и повышения плодородия лесных почв при лесовосстановлении и для рекультивации нарушенных земель.

Ключевые слова: почвенный субстрат; древесный субстрат; компостирование; биологическая обработка древесных отходов; лесовосстановление; выращивание сеянцев

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7143

Article

Study of wood waste-based soil substrates for forest seedlings growing

Elena Grafova

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
grafova.elena.karelia@gmail.com*

Olga Gavrilova

*D. Sc. in agriculture, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
ogavril@petsu.ru*

Viacheslav Gorbach

*D. Sc. in biology, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
gorbach@petsu.ru*

Received: 12 March 2023 / Accepted: 16 May 2023 / Published: 25 May 2023

Abstract: The seedlings low survival rate, reduced soil fertility and forest soils disturbance result in insufficient reforestation in Russia. This problem might be solved by cultivation substrates preparation that compensate for the lack of fertile soils and increase the sustainability of homogeneous forest plantations. Cultivation substrates were produced from the waste of Karelian timber industry enterprises by composting with addition of sewage sludge from nearby housing and communal services. The substrates fertile properties were evaluated by seeds germinating ability and growth rate of oats (*Avena sativa L.*) and Scotch pine (*Pinus sylvestris L.*). The substrates properties were compared with those of factory-made peat mixture. The distribution of the variant in the samples for compliance with the normal law was checked by the Shapiro-Wilk test. Resampling methods were used for statistical data processing. The range of variation of indicators was estimated using a simple nonparametric bootstrap method, and confidence intervals were established by the percentile method. The MCR randomization test was used for comparisons. Trends in the variability of indicators over time were described by logarithmic models. Substrates were produced by using pine sawdust (substrate 1) and bark (substrate 2). The production time of the substrates varied: 5 months and 1.5 years, respectively. The resulting substrates differed in chemical composition and morphological consistency. In both substrates, the content of heavy metals and the absence of pathogenic microorganisms and parasites corresponded

to sanitary standards thus ensuring their safety usage. The germination of oats seeds varied from 0 to 100%. The plants height in the control group did not differ significantly from that of substrate 2, but was significantly greater than in substrate 1. The germination rate of pine seeds ranged from 20 to 100%, the slowest seedlings growing rate was observed in substrate 1, the fastest one — in substrate 2. The average growing rates of plants in peat and substrate 2 did not differ significantly. Thus, no significant differences were found between the tested substrates for seed germination. The research results indicate that the fertile properties of the obtained substrates do not differ significantly from those prepared in the factory. Substrates obtained from fresh and long-term stored wood waste can be used to grow seedlings in nurseries, to increase the fertility of forest soils during reforestation, and to reclaim disturbed lands.

Keywords: soil substrate; wood substrate; composting; biological treatment of wood waste; reforestation; seedlings growing

1. Введение

Одной из актуальных проблем, сдерживающих развитие лесного комплекса, является недостаточный уход за лесами, который не позволяет повышать плодородие лесных почв и обеспечивать максимальный прирост древесины, что, в свою очередь, ограничивает возможности увеличения объёмов заготовок. Интенсивность лесовосстановления не достигает высоких уровней и темпов воспроизводства хозяйственно ценных лесов на наиболее продуктивных лесных землях, что приводит к необходимости освоения новых лесных участков, не обеспеченных транспортной инфраструктурой. За последние 20 лет ежегодные объёмы лесовосстановления остаются на уровне 800—900 тыс. га, что в два раза меньше предыдущего периода. Несоблюдение агротехники выращивания созданных лесных культур приводит к их высокой гибели в период до перевода в покрытую лесом площадь. Возникает необходимость разработки специальных мер по сохранению созданных лесных культур, повышению эффективности агротехнического ухода. Стратегия развития лесного комплекса РФ направлена на появление новых технологий, увеличение доли искусственного возобновления леса, использования семян с улучшенными наследственными свойствами, возрастания доли лесных культур, созданных с использованием посадочного материала с закрытой корневой системой, увеличение разнообразия пород лесных культур, развитие материально-технической базы путём модернизации парка лесохозяйственных машин и оборудования. Данные направления развития лесопромышленного комплекса свидетельствует о необходимости разработки технологий, направленных на поиск решений, способствующих повышению плодородия лесных деградирующих и нарушенных почв, обеспечению стабильно высокой всхожимости семян, повышению продуктивности древостоя.

Многие исследователи рассматривали возможности повышения плодородия лесных почв путём внесения различных удобрений. Так, с точки зрения экономической целесообразности в качестве удобрения применяются лесосечные отходы. Отмечено, что процесс естественной минерализации древесины может занимать годы [1], [9], [12]. Оптимальной считается доза внесения удобрений 30 т/га, которая может быть достигнута при запасе отходов 240 м³/га. Исследованиями [3], [6] установлено, что поступление органических веществ в почву со временем меняется, несмотря на накопление отходов на лесосеке, поскольку изменяется их химический состав в процессе вымывания. Таким образом, необработанные и неподготовленные парубковые отходы, оставленные на лесосеке как плодородный компонент удобрения, не представляют интереса.

Другим источником органики могут служить кородревесные отходы, избыток которых образуется на деревообрабатывающих предприятиях. Проведение биотестирования при добавлении различных доз коры при проращивании кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) свидетельствует о повышении биологической активности нарушенных почв при внесении дозировки 5—15 % отходов по массе [7]. Процессы разложения коры в естественных

условиях описаны в работе [14]. Содержание азота в коре значительно выше, чем в древесине, что обусловлено бóльшим количеством живых клеток в составе флоэмы [4], [5]. Наибольшее содержание азота на единицу массы выявлено у берёзы (0,95 %). Распределение содержания азота в коре пород по убыванию показателя следующее: осина (0,74 %), сосна и ель (0,61 %), лиственница (0,20 %). Кора хвойных пород имеет меньшие концентрации азота по сравнению с корой лиственных пород [15]. Со временем химический состав коры, хранящейся в отвалах, также меняется (таблица 1). Наиболее пригодна для удобрения свежесформованная кора, поскольку она содержит более высокие концентрации органического вещества, фосфора, калия.

Таблица 1. Химический состав кородревесных отходов различного срока хранения

Table 1. The chemical composition of bark and wood waste of various storage periods

№ п/п	Наименование показателя	Продолжительность хранения коры				
		Кора свежая	0—3 лет	3—5 лет	5—10 лет	более 10 лет
1	2	3	4	5	6	7
1	Азот общий, мас. %	0,015	0,008	0,020	0,015	0,550
2	Азот нитратный, мг/кг	4,1	3,0	2,3	1,0	1,40
3	Фосфор, мг/кг	4,4	3,0	3,2	2,0	0,8
4	Калий, мг/кг	41,0	14,0	25,0	11,0	3,0
5	Органическое вещество, мас. %	92,6	78,6	90,3	77,4	51,2

Для удобрения почвы необходимо ускорить процесс гумификации таким методом, как компостирование, которое является наиболее простым и дешёвым способом. В процессе компостирования происходит аэробная биодеструкция древесины, сопровождаемая экзотермическим процессом, способствующим гибели патогенной микрофлоры и паразитов, семян сорняков и пр. Для начала процесса компостирования необходимо обеспечить следующие условия: соотношение углерода (С) и азота (N), влажность, микробное дыхание, время обработки. Поскольку основным компонентом древесины является углерод, для начала биодеструкции необходимо добавить необходимое количество азота. Для интенсивного протекания микробиологических процессов оптимальным является соотношение С:N, равное 25. Содержание азота можно обеспечить внесением 0,5—1 % азотных удобрений, мочевины, аммиачной селитры и органических отходов, таких как навоз, помёт, осадки сточных вод и пр. По данным авторов публикаций [5], [8], соотношение С:N в зрелом компосте составляет 68, в свежей коре — 140, в коре с отвалов — примерно 70. По величине соотношения С:N кору с отвалов можно отнести к незрелому компосту. Скорость и эффективность компостирования также зависит от вида используемых древесных отходов: осиновая кора разлагается быстрее, чем кора хвойных пород. Для ускорения разложения древесных отходов часто используется внесение специальных микроорганизмов — активаторов компостирования, которые имеют

способность к деструкции целлюлозы и лигнина, трансформации продуктов их разложения в гумус [2]. В некоторых исследованиях [11] продемонстрирована эффективность предварительной сортировки отходов хвойных и лиственных пород, т. к. они отличаются по анатомическому строению, химическому составу, скорости разложения.

Согласно исследованиям публикации [10], получаемый после обработки субстрат может использоваться для повышения плодородия почв, в т. ч. лесных, улучшения её структуры и минеральных свойств. Разработкой и внедрением технологии получения почвенных субстратов и почвогрунтов занимались многие авторы [6], [11], [41]. В настоящее время существуют технологические средства и технологии, позволяющие провести компостирование отходов любых древесных пород с применением различных, доступных для предприятий органических добавок. Основное время биотермической подготовки компоста 3—6 мес., полное время дозревания компоста составляет от 1,5 до 2 лет. С точки зрения экономической целесообразности оптимальным периодом подготовки субстрата в условиях севера должен служить один летний период, поскольку для продолжительного производства требуются большие площади, уход и контроль за процессом, применение техники. Целью настоящих исследований является проверка свойств субстратов, полученных в результате биодеструкции методом компостирования двух наиболее типичных видов древесных отходов и разных периодов выдержки компостной смеси — полной выдержки и однолетней.

2. Материалы и методы

Почвенные субстраты произведены из отходов лесопромышленных предприятий Соломенского и Сортавальского лесозаводов Карелии. Субстраты подготовлены методом компостирования. В качестве азотной составляющей использовался осадок сточных вод близлежащих предприятий ЖКХ — Петрозаводского и Сортавальского соответственно. Компостирование древесных отходов, в конкретном случае, основано на стимуляции естественной микробиоты компостной смеси. Технологические параметры производства субстратов и характеристики полученных субстратов представлены в таблицах 2 и 3. Для оценки пригодности полученных субстратов для выращивания семян при лесовосстановлении проведены исследования всхожести семян и скорости роста овса (*Avena sativa* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Для сравнения в качестве контрольного субстрата выбрана торфосмесь (Фаско, Россия) заводского производства.

Проведено две серии экспериментов: первая серия — выращивание семян овса. Производилось в выбранных субстратах. Субстраты помещались в ёмкости для выращивания в объёме 250 мл по 15 шт. для каждого субстрата. В каждую ёмкость засеивалось по 5 семян. Вторая серия — выращивание семян сосны, проводилось таким же образом.

Таблица 2. Характеристики технологии производства субстратов

Table 2. Characteristics of substrate production technology

Наименование	Источник отходов	Вид отходов	Соотношение смеси	Время обработки
Субстрат 1	Сортавальский лесозавод; предприятие ЖКХ, г. Сортавала	Свежеобразованный осадок сточных вод, трёхлетний осадок сточных вод, опилки сосны	1 : 1 : 3	70 дней
Субстрат 2	Соломенский лесозавод; предприятие ЖКХ, г. Петрозаводск	Свежеобразованный осадок сточных вод, кора сосны	2 : 3	1,5 года

Таблица 3. Сравнение химических показателей полученных субстратов с контрольным

Table 3. The chemical parameters comparison of the obtained substrates with the control ones

Наименование показателя	Норма содержания	Субстрат 1	Субстрат 2	Торф (контроль)
Азот аммонийный, мг/кг	0,6	180	360	100—200
Азот нитритный, мг/кг		0,062	0,56	—
Фосфат-ион, не менее, мг/кг	1,5	25	25	80—150
Органическое вещество, не менее, мг/кг	20	60	63	—
Массовая доля подвижного калия, мг/кг почвы	> 250	472	951,0	200—300
Превышение содержания тяжёлых металлов, мг/кг	по ГОСТ Р 8.563	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Присутствие патогенных микроорганизмов	по ГОСТ Р 8.563	отсутствует	отсутствует	отсутствует

Распределение вариант в выборках на соответствие нормальному закону проверили критерием Шапиро — Уилка. Установили, что в ряде случаев эмпирические распределения значимо отклоняются от теоретического и не могут быть нормализованы с помощью стандартных процедур. Поэтому для статистической обработки данных использовали методы ресамплинга, не требующие соответствия каким-либо теоретическим закономерностям [13]. Выборки сравнивали по трём показателям — средней арифметической (M), стандартному отклонению (S), измеряющему изменчивость признака, и медиане (Me), более адекватно описывающей величину признака в выборках, отклоняющихся от нормального распределения. Диапазон варьирования показателей оценивали посредством простого непараметрического бутстрепа с числом итераций $B = 1000$, достаточным для уровня вероятности $P = 0.95$, доверительные интервалы устанавливали методом процентилей.

Для сравнений использовали рандомизационный тест (MCR — Monte Carlo Randomization) с тем же числом итераций B . Значимость отличий p при таком подходе представляет собой скорректированную долю нуль-модельных комбинаций (эмпирическая разность показателей не больше рандомизированной, $|d_{\text{obs}}| \leq |d_{\text{ran}}|$) от общего числа испытаний B . Критической величиной для p принято стандартное значение $\alpha = 0,05$.

Тренды изменчивости показателей во времени описывали логарифмическими моделями вида $y = a \cdot \ln(T) + b$, где y — число проросших семян N или высота стеблей растений L (см), а T — время в днях, модельный параметр a определили в качестве средней скорости прорастания семян или скорости роста растений соответственно. Равенство условий старта процессов обеспечили назначением коэффициента b константой. Значения a подбирали, используя итеративную процедуру подгонки под требование $b = \text{const}$. Методом ресамплинга генерировали по 100 моделей для каждого исследуемого случая, доверительные интервалы возможных значений a устанавливали методом процентилей, сравнивали с помощью MCR-теста.

Данные обрабатывали в среде MS Excel и R 4.0.1 [16] с использованием базовых функций и функций пакета Composition [17].

3. Результаты

Полученные методом компостирования и контрольный субстраты отличаются по химическому составу и морфологической консистенции. Торфяной субстрат является сбалансированным подготовленным продуктом, размеры частиц более 3 мм. Субстрат 2, полученный из отходов Соломенского лесозавода, обладает высоким содержанием азота и калия, более неоднородным морфологическим составом: встречаются размеры частиц до 16 мм в виде древесных включений. Субстрат 1, полученный из отходов Сортавальского лесозавода, имеет наиболее низкие характеристики содержания биогенных элементов и также обладает неоднородным морфологическим составом с включениями древесины размерами до 10 мм. Химический состав полученных субстратов соответствует современным требованиям, предъявляемым к почвогрунтам, подготовленным с применением осадков сточных вод. Во всех подготовленных субстратах содержание тяжёлых металлов в норме, патогенные микроорганизмы и паразиты отсутствуют, что определяет санитарную безопасность их применения.

Почти все семена овса вошли к концу первой недели наблюдений, дальнейший прирост составил менее 2 % (фото 1а). Всхожесть в пробах варьировала от 0 до 100 %. Наблюдаемые отличия по числу проросших семян для сравниваемых типов субстратов по всем показателям случайны (таблица 4). К концу эксперимента длина растений в контроле (торф) не отличалась существенно от субстрата 2, но была значимо больше, чем в субстрате 1. Вместе с тем больше была и изменчивость длины, измеряемая стандартным отклонением. Это указывает на задержку роста отдельных растений в торфе, проиллюстрированную на рисунке 1 отклонением маркеров от общего ряда. Сравнение средних скоростей роста

(таблица 5) поддерживает вывод о меньшей благоприятности для развития растений в субстрате 1.

Семена сосны проросли больше месяца, итоговая всхожесть составила от 20 до 100 % (фото 1б).

С начала всхода активного роста ростков сосны ещё не наблюдали, он начался только через месяц и стал достаточным для выполнения корректных измерений. В то время как рост сеянцев овса был равномерным на протяжении всего периода выращивания.



Фото 1. Результаты всхожести семян на подготовленных субстратах: *a* — овёс; *б* — сосна: торф, субстрат 2, субстрат 1

Photo 1. The results of seed germination on prepared substrates: **(a)** oats; **(b)** pines: peat, substrate 2, substrate 1

По числу проросших семян испытываемые субстраты значимо не различались, лишь для торфа показана наиболее высокая изменчивость (таблица 6) — следствие большей неравномерности всхожести в разных пробах. Динамика прорастания семян дана на рисунке 2. Быстрее всего семена всходили в субстрате 2, тем не менее показанные отличия средних скоростей не существенны (таблица 7). Самый медленный рост сеянцев наблюдали в субстрате 1, самый быстрый — в субстрате 2 (рисунок 3). И если средние скорости роста растений в торфе и субстрате 2 значимо не различались, то для субстрата 1 установлено существенное отличие от базовой составляющей — торфа (таблица 8). Таким образом, установлено отсутствие существенных различий испытываемых субстратов для прорастания семян, но в торфе и субстрате 2 растения растут быстрее, чем в субстрате 1.

Таблица 4. Всхожесть семян и длина стеблей овса к концу эксперимента в разных видах субстрата

Table 4. Oats seed germination and stem length by the end of the experiment in different substrate types

Показатели	Торф	Субстрат 1	<i>p</i>	Субстрат 2	<i>p</i>
Число проросших семян					
<i>n_a</i>	10	10		10	
<i>lim</i>	0—5	1—4		0—4	
<i>M</i>	3,4 (2,3—4,4)	2,6 (2,1—3,1)	0,297	1,8 (1,1—2,6)	0,071
<i>S</i>	1,8 (0,9—2,3)	0,8 (0,4—1,1)	0,056	1,3 (0,7—1,6)	0,419
<i>Me</i>	3,5 (2,0—5,0)	3,0 (2,0—3,0)	0,396	2,0 (1,0—3,0)	0,146
Длина стеблей растений, см					
<i>n_b</i>	34	26		18	
<i>lim</i>	4,8—35,5	12,8—28,5		17,5—39,8	
<i>M</i>	26,6 (24,1—28,6)	22,6 (21,4—23,7)	0,010	29,4 (26,6—32,2)	0,170
<i>S</i>	6,8 (4,2—9,0)	3,2 (1,7—4,3)	0,003	6,0 (4,2—7,4)	0,756
<i>Me</i>	28,2 (24,9—30,0)	23,3 (22,5—23,7)	0,003	29,4 (26,1—33,2)	0,650

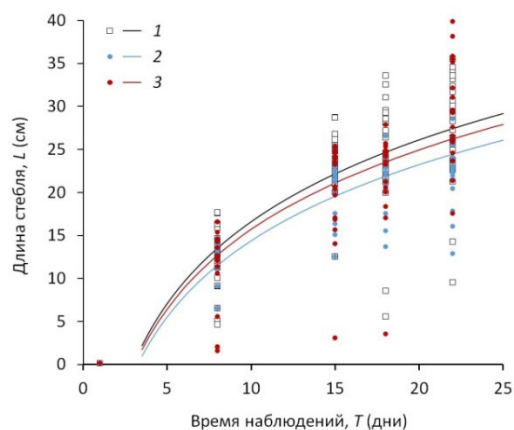
Примечание: *n_a* — число стаканчиков с 5 семенами в каждом; *n_b* — число растений; *lim* — интервал варьирования; *M* — средняя арифметическая; *S* — стандартное отклонение; *Me* — медиана (в скобках указаны доверительный интервал показателя, полученный методом бутстрепа); *p* — значимость отличий показателей для КОС от торфа (MCR-тест), полужирным шрифтом указаны значимые отличия.

Таблица 5. Скорость роста стеблей овса, логарифмическая модель $L = a \ln(T)-15$

Table 5. Oats halms growth rate, logarithmic model $L = a \ln(T)-15$

Наименование среды	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>lim</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>R</i> ²	<i>p_g</i>
Торф	128	13,7	13,4—14,0	88,0	< 0,001	0,583	—
Субстрат 1	104	12,8	12,6—13,0	104,8	< 0,001	0,622	0,010
Субстрат 2	72	13,3	12,9—13,8	51,8	< 0,001	0,539	0,158

Примечание: *a* — средняя скорость роста стеблей; *L* — ожидаемая длина стебля (см); *T* — время (дни); *n* — число измерений растений; *lim* — доверительный интервал модельного параметра *a* (бутстреп-метод, процентиля); *t* — значение критерия Стьюдента; *p* — значимость отличий *a* от нуля; *R*² — коэффициент детерминации, *p_g* — значимость отличий *a* для КОС от торфа (MCR-тест), полужирным шрифтом указаны значимые отличия.



Примечание: маркеры указывают промеры стеблей, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 5.

Рисунок 1. Динамика роста стеблей овса в разных видах субстрата: 1 — торф; 2 — субстрат 1; 3 — субстрат 2

Figure 1. Dynamics of oats halms growth in different substrates types: 1 – peat; 2 – substrate 1; 3 – substrate 2

Таблица 6. Всхожесть семян и длина стеблей сосны к концу эксперимента в разных видах субстрата

Table 6. Seeds germination and pine stems length by the end of the experiment in different substrate types

Показатели	Торф	Субстрат 1	<i>p</i>	Субстрат 2	<i>p</i>
Число проросших семян					
<i>n_a</i>	15	15	—	15	—
<i>lim</i>	1—5	2—5	—	2—5	—
<i>M</i>	3,6 (2,7—4,5)	3,3 (2,8—3,7)	0,591	4,2 (3,7—4,7)	0,294
<i>S</i>	1,7 (1,2—2,1)	0,9 (0,6—1,1)	< 0,001	0,9 (0,5—1,3)	0,013
<i>Me</i>	4,0 (2,0—5,0)	3,0 (3,0—4,0)	0,726	4,0 (4,0—5,0)	0,999
Длина стеблей растений, см					
<i>n_b</i>	62	51	—	53	—
<i>lim</i>	5,0—12,0	3,0—9,0	—	2,5—11,5	—
<i>M</i>	7,5 (7,2—7,9)	6,2 (5,9—6,5)	< 0,001	7,8 (7,3—8,3)	0,446
<i>S</i>	1,4 (1,2—1,7)	1,2 (0,9—1,4)	0,270	2,0 (1,7—2,4)	0,002
<i>Me</i>	7,5 (7,0—8,0)	6,5 (6,0—6,5)	< 0,001	8,0 (7,0—9,0)	0,851

Примечание: *n_a* — число стаканчиков с 5 семенами в каждом, другие обозначения даны в таблице 4.

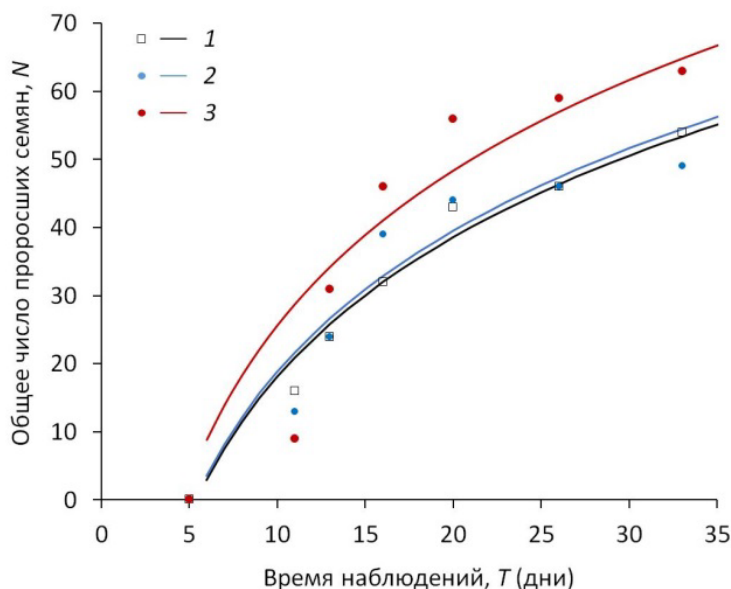


Рисунок 2. Динамика прорастания семян сосны в разных видах субстрата: 1 — торф; 2 — субстрат 1; 3 — субстрат 2: маркеры указывают промеры стеблей, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 7

Figure 2. Dynamics of pine seed germination in different substrate types: 1 — peat; 2 — substrate 1; 3 — substrate 2: markers indicate measurements of stems, lines indicate trends in the variability of the indicator in each type of soil, model parameters are given in Table 7

Таблица 7. Скорость прорастания семян сосны, логарифмическая модель $N = a \ln(T) - 50$

Table 7. Germination rate of pine seeds, logarithmic model $N = a \ln(T) - 50$

Наименование среды	n	a	lim	t	p	R^2	p_g
Торф	7	29,6	29,0—30,4	40,9	< 0,001	0,911	
Субстрат 1	7	29,9	28,2—30,9	42,6	< 0,001	0,902	0,713
Субстрат 2	7	32,8	29,9—34,1	29,3	< 0,001	0,864	0,089

Примечание: a — средняя скорость прорастания семян, N — ожидаемое число проросших семян, T — время (дни), n — число дат измерений, другие обозначения даны в таблице 5.

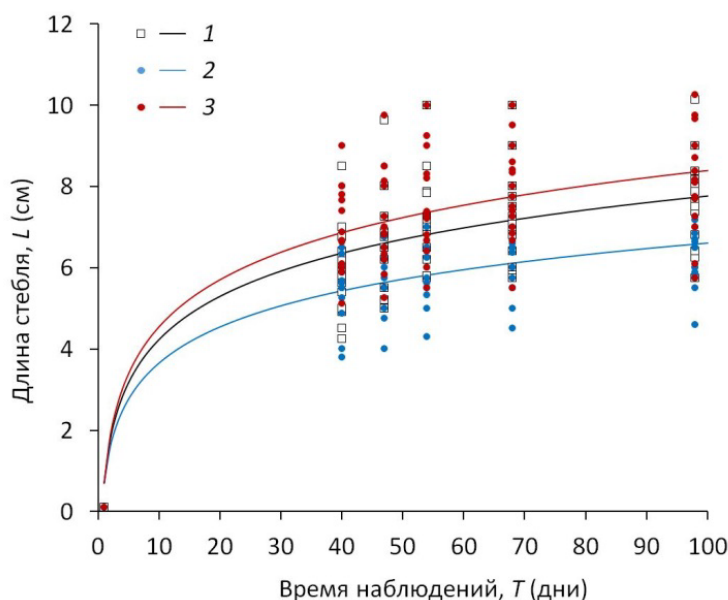


Рисунок 3. Динамика роста стеблей сосны в разных видах субстрата: маркеры указывают среднюю длину стеблей в каждом стаканчике, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 8

Figure 3. The growth dynamics of pine stems in different substrate types: markers indicate the average length of stems in each cup, lines indicate trends in the variability of the indicator in each type of soil, model parameters are given in Table 8

Таблица 8. Скорость роста стеблей сосны, логарифмическая модель $L = a \ln(T) + 0.7$

Table 8. Pine stem growth rate, logarithmic model $L = a \ln(T) + 0.7$

Наименование среды	n	a	lim	t	p	R^2	p_g
Торф	76	1,53	1,47—1,59	48,9	< 0,001	0,428	
Субстрат 1	76	1,28	1,25—1,32	61,2	< 0,001	0,464	0,010
Субстрат 2	76	1,67	1,58—1,73	50,3	< 0,001	0,389	0,060

Примечание: a — средняя скорость роста стеблей; n — число измерений; варианта — средняя длина стеблей сосны в одном стаканчике, другие обозначения даны в таблице 5.

4. Обсуждение и заключение

Результаты исследований свидетельствуют о том, что плодородные свойства полученных субстратов значительно не отличаются от торфосмеси, подготовленной в заводских условиях. Плодородные качества в большей степени зависят от количества и состава

вносимых дополнительно компонентов на стадии формирования смеси для субстрата. Всхожимость и рост сеянцев в субстрате, полученном в более короткий производственный срок, незначительно уступает сеянцам, выращенным в субстрате с длительным периодом изготовления. Это свидетельствует о том, что субстрат, поученный в короткий летний период, можно использовать для выращивания сеянцев в питомниках и повышения плодородия лесных почв при лесовосстановлении. Для предприятий лесной промышленности сокращение сроков производства субстратов обуславливает экономические эффекты и решает многолетнюю проблему сокращения образования неиспользуемых отходов. Полученные методом компостирования субстраты могут применяться как рекультивант при восстановлении нарушенных лесных территорий. Таким образом, изготовление почвенных субстратов позволит решить производственные проблемы накопления древесных отходов, включая некондиционные, и отходы длительного срока хранения.

Список литературы

1. *Андреев А. А.* Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты.* 2014. № 10. С. 148—155.
2. Получение органоминеральных удобрений на основе древесной коры (обзор) / *Е. В. Веприкова, С. А. Кузнецова, Н. В. Чесноков [и др.]* // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия.* 2016. Т. 9, № 4. С. 414—429. DOI: <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2016-9-4-414-429>.
3. *Галдина Т. Е., Кулаков А. В., Ранцев-Картинов В. А.* Переработка отходов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий в нетрадиционный мелиоративный субстрат с применением экологически чистых технологий // *Лесотехнический журнал.* 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 24—34. DOI: [10.34220/issn.2222-7962/2021.2/3](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/3).
4. *Графова Е. О., Паршин Н. В.* Исследование методов обработки осадков сточных вод петрозаводских очистных сооружений // *Resources and Technology.* 2019. Т. 16, № 4. С. 94—118.
5. *Дейнеко И. П., Фаустова Н. М.* Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // *Химия растительного сырья.* 2015, Т. 1. С. 51—62.
6. *Залесов С. В., Фролова Е. А., Лисина Е. И.* Возможность использования нетрадиционных удобрений при выращивании посадочного материала в лесных питомниках // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета.* 2015. № 2 (34). С. 104—108.
7. *Кайгородов Р. В.* Влияние кородревесных отходов на биологическую активность техногенных поверхностных образований придорожных пространств // *Успехи современного естествознания.* 2019. № 11. С. 83—88.
8. *Курило О. Н., Ширинкина Е. С., Вайсман Я. И.* Способ использования ресурсного потенциала коры длительного срока хранения // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология.* 2014. № 1. С. 79—87.
9. Оценка уровня негативного воздействия на компоненты природной среды несанкционированной свалки у п. Самофаловка Волгоградской области /

- О. А. Мишустин, С. Б. Хантимирова, В. Ф. Желтобрюхов [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. С. 50.
10. Мохирев А. П., Безруких Ю. А., Медведев С. О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона — Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. 2015. № 2, ч. 2. 13 с.
 11. Мохирев А. П., Рубинская А. В., Мезенцева Н. В. Получение органических удобрений из отходов лесозаготовительной деятельности как способ повышения комплексного использования древесины // Международные научные исследования. 2015. № 3 (24). С. 147—151.
 12. Сергиенко А. В., Яцун И. В. Необходимость рационального использования отходов деревообработки // Наука и образование сегодня. 2017. № 1 (12). С. 12—13.
 13. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Исп. и доп. интернет-версия от 15.11.2013. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
 14. The cover uncovered: bark control over wood decomposition / G. G. O. Dossa, D. Schaefer, J.-L. Zhang [et al.] // Journal of Ecology. 2018. No. 106. P. 2147—2160.
 15. Palviainen M., Finér L. Decomposition and nutrient release from Norway spruce coarse roots and stumps — a 40-year chronosequence study // Forest Ecology and Management. 2015. No. 358. P. 1—11. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.08.036>.
 16. R Core Team (2021). R: a language and environment for statistical computing. R version 4.1.2. (2021—11—01). Vienna: R Foundation for statistical computing, 2021. Available at: <http://www.r-project.org/> (accessed on: 01.03.2022). Text. Image: electronic.
 17. Van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., Bren M. Package ‘composition’. Compositional data analysis. 2022. Version 2.0—4. Available at: <https://cran.microsoft.com/web/packages/compositions/compositions.pdf>. (accessed on: 10.04.2022). Text. Image: electronic.

References

1. Andreev A. A. Resource saving and use of waste materials for harvesting and processing of wood raw materials. *Fundamental and applied research: problems and results*, 2014, no. 10, pp. 148—155. (In Russ.)
2. Veprikova E. V., Kuznetsova S. A., Chesnokov N. V., Kuznetsov B. N. Obtaining organomineral fertilizers based on tree bark (review). *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 414—429. doi: <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2016-9-4-414-429>. (In Russ.)
3. Galdina T. E., Kulakov A. V., Rantsev-Kartinov V. A. *Forest Engineering Journal*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 24—34. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/3. (In Russ.)
4. Grafova E. O., Parshin N. V. Investigation of methods for treating sewage sludge from Petrozavodsk treatment facilities. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 94—118. (In Russ.)
5. Deineko I. P., Faustova N. M. Elemental and group chemical composition of aspen bark and wood. *Chemistry of plant raw materials*, 2015, vol. 1, pp. 51—62. (In Russ.)
6. Zalesov S. V., Frolova E. A., Lisina E. I. Possibility of using non-traditional fertilizers when growing planting material in forest nurseries. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*, 2015, no. 2 (34), pp. 104—108. (In Russ.)

7. Kaigorodov R. V. Influence of bark and wood waste on the biological activity of technogenic surface formations of roadside spaces. *Successes of modern natural science*, 2019, no. 11, pp. 83—88. (In Russ.)
8. Kurilo O. N., Shirinkina E. S., Vaisman Ya. I. A method of using the resource potential of the long-term storage bark. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2014, no. 1, pp. 79—87. (In Russ.)
9. Mishustin O. A., Khantimirova S. B., Zheltobryukhov V. F. [et al.] Assessment of the level of negative impact on the components of the natural environment of an unauthorized dump near the village of Samofalovka, Volgograd Region. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 9, p. 50. (In Russ.)
10. Mokhirev A. P., Bezrukikh Yu. A., Medvedev S. O. Processing of wood waste from timber industry enterprises as a factor in sustainable nature management. *Engineering Bulletin of the Don-North Caucasian Scientific Center of the Higher School of the Southern Federal University*, 2015, no. 2, part 2. 13 p. (In Russ.)
11. Mokhirev A. P., Rubinskaya A. V., Mezentseva N. V. Obtaining organic fertilizers from logging waste as a way to increase the integrated use of wood. *International Scientific Research*, 2015, no. 3 (24), pp. 147—151. (In Russ.)
12. Sergienko A. V., Yatsun I. V. The need for rational use of woodworking waste. *Science and education today*, 2017, no. 1 (12), pp. 12—13. (In Russ.)
13. Shitikov V. K., Rozenberg G. S. *Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R. Corrected and supplemented Internet version dated 11/15/2013*. Tolyatti, Cassandra, 2013. 314 p. (In Russ.)
14. Dossa G. G. O., Schaefer D., Zhang J.-L., Tao J.-C., Cao K.-F., Corlett R. T., Cunningham A. B., Xu J.-C., Cornelissen J. H. C., Harrison R. D. The cover uncovered: bark control over wood decomposition. *Journal of Ecology*, 2018, no. 106, pp. 2147—2160.
15. Palviainen M., Finér L. Decomposition and nutrient release from Norway spruce coarse roots and stumps — a 40-year chronosequence study. *Forest Ecology and Management*, 2015, no. 358, pp. 1—11. doi: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.08.036>.
16. R Core Team (2021). R: a language and environment for statistical computing. R version 4.1.2. (2021—11—01). Vienna: R Foundation for statistical computing, 2021. Available at: <http://www.r-project.org/>. (accessed on: 01.03.2022). Text. Image: electronic.
17. Van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., Bren M. Package ‘composition’. Compositional data analysis. 2022. Version 2.0—4. Available at: <https://cran.microsoft.com/web/packages/compositions/compositions.pdf>. (accessed on: 10.04.2022). Text. Image: electronic.