


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/1>


УДК 630*232.32:504.75.05



Оценка способности к биодegradации в почве ячеек из целлюлозы, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев

Данил Р. Агадуллин¹✉, agadullindan@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>

Александр В. Гурьев¹, a.guriev@narfu.ru,

Ольга П. Лебедева¹, o.lebedeva@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

¹ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация

Исследование посвящено оценке скорости и степени биодegradации в почве целлюлозных ячеек, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев, как экологичной альтернативы пластиковым кассетам. В эксперименте использовались два типа композиций на основе целлюлозных волокон, заглублённые в трёх типах почвенных субстратов (почва из-под ельника черничного, компост, торфоземельная смесь). Для определения потери массы образцов применялся гравиметрический метод. Установлено, что степень разложения материалов составила в среднем 87 % и 84 % для двух композиций соответственно. На основе полученных данных прогнозируемое время полного разложения оценивается в 57–59 суток. Наибольшая интенсивность дegradации зафиксирована в торфоземельной смеси. Статистический анализ подтвердил значимое влияние типа целлюлозной композиции на скорость биодegradации. В ходе эксперимента с использованием дождевых червей рода *Allolobophora* в качестве биоиндикаторов не выявлено визуально наблюдаемых признаков негативного воздействия разлагающихся материалов на почвенную фауну. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения биоразлагаемых целлюлозных кассет для лесовосстановления как способа снижения пластиковой нагрузки на экосистемы.

Ключевые слова: биоразлагаемые кассеты, целлюлозные материалы, лесовосстановление, почвенные субстраты, *moulded pulp*

Финансирование: исследование выполнено за счет средств Программы развития САФУ на 2021–2035 гг., договор Д-468.2025.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Агадуллин, Д. Р. Оценка способности к биодegradации в почве ячеек из целлюлозы, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев / Д. Р. Агадуллин, А. В. Гурьев, О. П. Лебедева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 6–17. – Библиогр.: с. 14–16 (20 назв.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/1>.


Поступила 25.02.2026. Пересмотрена 24.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Assessment of the biodegradation capacity in the soil of cellulose cells intended for industrial cultivation of seedlings

Danil R. Agadullin¹✉, agadullindan@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>

Alexander V. Guriev¹, a.guriev@narfu.ru,

Olga P. Lebedeva¹, o.lebedeva@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnaya Dvina, 17, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract

This study assessed the rate and extent of biodegradation in soil of cellulose cells intended for industrial seedling cultivation, as an environmentally friendly alternative to plastic cassettes. The experiment utilized two types of cellulose fiber-based compositions embedded in three types of soil substrates (soil from a blueberry spruce forest, compost, and a peat-soil mixture). A gravimetric method was used to determine sample mass loss. The average decomposition rate of the materials was 87 % and 84 % for the two compositions, respectively. Based on the data obtained, the predicted time for complete decomposition is estimated at 57–59 days. The highest degradation rate was recorded in the peat-soil mixture. Statistical analysis confirmed a significant impact of the cellulose composition type on the rate of biodegradation. An experiment using earthworms of the genus *Allolobophora* as bioindicators revealed no visually observable negative impacts of decomposing materials on soil fauna. The results demonstrate the potential of using biodegradable cellulose cassettes for reforestation as a way to reduce the plastic load on ecosystems.

Keywords: *biodegradable cassettes, cellulosic materials, reforestation, soil substrates, molded pulp*

Financing: the study was carried out at the expense of the NARFU Development Program for 2021-2035, contract D-468.2025.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Agadullin D. R., Guriev A. V., Lebedeva O. P. (2026). Assessment of the biodegradation capacity in the soil of cellulose cells intended for industrial cultivation of seedlings. *Forestry Engineering journal*, Vol. 62, No. 2 (62), pp. 6-17 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/1>.

Received 25.02.2026.

Revised 24.03.2026.

Accepted 15.05.2026. *Published online* 26.06.2026

Введение

Искусственное лесовосстановление, являющееся ключевым инструментом воспроизводства ценных лесных ресурсов, в значительной степени зависит от качества посадочного материала. Согласно правилам восстановления лесов¹ в Архангельской области используются семена хвойных пород (сосна и ель), а с 1 марта 2025 года пункт 5 Правил предусматривает, что не менее 30 % площадей искусственного и комбинированного лесовосстановления выполняется посадкой семян и (или) саженцев с закрытой корневой системой. Широко распространенная технология выращивания семян в пластиковых кассетах РКЛ-81 и 100 марки Plantek или ВВС приводит к образованию трудноперерабатываемых отходов, поскольку после эксплуатации кассеты направляются на полигоны, становясь источником долговременного загрязнения. Накопление устойчивых к деградации синтетических полимеров в экосистемах представляет собой одну из наиболее острых глобальных экологических проблем [1, 2]. Особую опасность представляет загрязнение почв, где в результате накопления «микропластика» нарушаются физико-химические свойства грунта, ухудшается его структура, что в совокупности негативно влияет на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов [3]. В связи с этим возрастает интерес к альтернативным вариантам, способным устранить озвученную проблему в виде пластикового загрязнения.

Перспективной альтернативой являются биоразлагаемые кассеты (рис. 1), изготовленные по технологии moulded pulp (формования изделий из целлюлозной суспензии) [4, 5]. Основным сырьём, для изготовления кассет служат целлюлозные волокна (первичные и вторичные). В настоящее время в качестве сырья рассматривается побочный продукт (отход) в виде сучковой массы целлюлозно-бумажного производства, который в процессе сульфатной варки не разделился на отдельные волокна.

Главное преимущество кассет заключается в способности к биодegradации в почве, что не только решает проблему загрязнения, но и потенциально может упрощать технологический процесс лесовосстановления путём высадки семян непосредственно в биоразлагаемых ячейках. Объём контейнерного субстрата, помещённого в ячейку, полностью соответствует параметрам стандартизованных пластиковых аналогов, что обеспечивает выращивание семени согласно существующим нормативным требованиям. Основная гипотеза данного исследования заключается в том, что замена традиционных пластиковых кассет на биоразлагаемые позволяет сократить использование пластика.

Пилотные опыты промышленного применения таких кассет ведутся на базе лесного селекционно-семеноводческого центра Архангельского ЦБК в г. Новодвинске. Однако для их широкого внедрения в практику искусственного лесовосстановления требуются дополнительные

¹Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта

лесовосстановления и внесения в него изменений. Приказ Минприроды от 29.12.2021 № 1024.

исследования, в первую очередь, направленные на оценку скорости и полноты биodeградации материалов кассет в конкретных почвенно-климатических условиях региона.



Рисунок 1. Внешний вид биоразлагаемой кассеты, изготовленной по технологии moulded pulp

Figure 1. Appearance of a biodegradable cassette manufactured using molded pulp technology

Источник: собственная фотография авторов

Source: the authors' own photograph

Следует также отметить, что сфера применения биоразлагаемых кассет не ограничивается промышленным лесовосстановлением. Данная технология является актуальной для частного садоводства, питомниководства декоративных культур и агропроизводственных комплексов, где также растет спрос на экологичные и удобные решения для выращивания растений.

Разложение целлюлозных волокон на составляющие представляет собой сложный микробиологический процесс, осуществляемый бактериями и грибами, которые вырабатывают специальные ферменты для их деградации [6, 7]. Процесс включает стадии: деполимеризации, ассимиляции образовавшихся мономеров и олигомеров микробными клетками, а также последующей минерализации [8]. Лигнин, являясь гетерогенным ароматическим полимером, демонстрирует значительно более высокую устойчивость к микробной деградации по сравнению с целлюлозой, что подтверждается исследованиями, показывающими прямую зависимость скорости биodeградации от содержания лигнина в материале [8-10].

На скорость биodeградации целлюлозных материалов влияет комплекс факторов, включая состав целлюлозных волокон [8], массу 1 м² материала [11,12], влажность почвы [12], температуру [13], аэрацию почвы [14], pH почвы [14] и пр. При этом, наличие поверхностных покрытий в составе материала приводит к замедлению биodeградации [15, 16]. N.B. Erdal и M. Nakkarainen (2022) [14] отмечают, что различные виды целлюлозной продукции (бумаги и картона)

демонстрируют резко различную скорость биоразложения в контролируемых условиях. Несмотря на значительное количество научных работ, посвященных биodeградации целлюлозных материалов, специализированные изделия, изготовленные по технологии moulded pulp, остаются с этой точки зрения недостаточно изученными.

Целью настоящего исследования является определение скорости и степени разложения целлюлозных ячеек для лесовосстановления в различных почвенных условиях.

Объекты и методы исследования

Климатические условия Архангельской области относятся к умеренному поясу с морским влиянием. Зимний период характеризуется умеренно низкими температурами, а летний период – умеренно теплыми температурами. Средняя температура воздуха в январе составляет около -12...-14 °С, в июле – 16...17 °С. Вегетационный период проходит при пониженных температурах воздуха и продолжается около 130 дней: с начала-конца мая и до конца сентября-начала октября.

Исследование проводили в теплице учебно-опытного участка САФУ имени М.В. Ломоносова в течение вегетационного периода. Оценку биodeградации целлюлозных материалов проводили гравиметрическим методом по потере массы образцов после их экспозиции в почве. Методика основана на модификации подхода, используемого в методе аппликационного определения дыхания грунтов [17] в вегетационных сосудах. Отличие заключается в том, что мы не рассматриваем микробиологическую активность грунта, а прямая цель опыта в оценке степени деструкции самого целлюлозного материала. Оптимальные условия для разложения целлюлозы обычно возникают при температуре 25–35 °С и влажности около 60 % от максимальной влагоёмкости [18].

Вегетационный сосуд представляет собой сетчатый ящик, который моделирует шаг посадки 0,7 м и позволяет создать условие, которое обеспечивает полное нахождение образцов в пределах стандартного корнеобитаемого слоя (0...20 см). На такое размещение в полевых условиях приходится 1 целлюлозная ячейка. Почвенный субстрат использовался, с различной исходной микробиологической активностью: почва из-под ельника черничного, компост и торфоземельная смесь, применяемая в городском озеленении с основой из торфа (70 %). Такой выбор был обусловлен следующими факторами. Почва из-под ельника черничного представляет собой наиболее распространенный тип лесных почв в регионе исследования. Компост был включен в эксперимент как широко используемый субстрат в частном садоводстве, что позволяет оценить потенциальное применение биоразлагаемых кассет не только

в целях лесовосстановления, но и в условиях антропогенных ландшафтов. Торфоземельная смесь была выбрана как показательный тип почвенного субстрата, используемый при озеленении городских территорий, что расширяет потенциальную область применения разрабатываемых кассет.

Кассеты получали по технологии moulded pulp путём их формования из волокнистой суспензии концентрацией 0,3 % с последующим термоформованием (горячим прессованием) до получения готовых изделий. Технологический процесс создания формованных кассет из растительных волокон включает подготовку сырья (разволокнение, очистка, гидромеханическая обработка в конических/дисковых мельницах) и формование (вакуумное обезвоживание кассет до 35 % влаги) с последующей сушкой до 4–8 % влаги. Получаемые кассеты, как их аналоги в виде горшков, обладают высокой биоразлагаемостью, водо- и воздухопроницаемостью, позволяя корням проникать через стенки и высаживать саженцы без извлечения, повышая производительность труда за счет исключения операций по сбору, отбору, хранению, очистке и стерилизации пластиковых аналогов [5, 19].

В качестве образцов для исследования биодеградации использованы два типа целлюлозных композиций: первая – 70 % лиственной и 30 % хвойной сучковой массы; вторая – 80 % лиственной полуцеллюлозы (ПЦ) и 20 %

хвойной целлюлозы высокого выхода (ЦВВ). Технологический режим изготовления подбирался индивидуально для каждого состава на установке прототипирования. Для композиции 1 время набора и обезвоживания волокна составило 0,8–1,0 с и 35–45 с соответственно; для композиции 2 — 3,6–3,9 с и 50–60 с. Сушка изделий осуществлялась методом термоформования при температурах 180–190 °С в течение 300–400 с.

Для моделирования деградации целлюлозных кассет (4,0–4,8 г) в почве изготовили 24 фрагмента массой 0,12–0,14 г (3 % целой кассеты, 2×3 см). Каждый фрагмент подвергался кондиционированию согласно ГОСТ 13523-78 (температура 23 ± 1 °С, относительная влажность 50 ± 2 %) с последующим взвешиванием для определения его массы, нумеровался и фиксировался при помощи скобы на поликарбонатных аппликационных пластинах (рис. 2, а). Пластины установлены в почве таким образом, что их верхняя грань находилась на глубине 3...5 см от поверхности почвы (рис. 2, б). В течение всего эксперимента влажность почв поддерживалась на уровне 60 % от полной влагоемкости. В течение опыта каждые 10 суток аппликационные пластины раскапывались, но не вынимались полностью т.к. это могло привести к нарушению почвенного биома. Пластины осматривались на степень деградации целлюлозных материалов и при достижении данного показателя более 80 %, все пластины извлекались для измерений.



а | а



б | б

Рисунок 2. Аппликационные пластины с образцами (а) и их установка в почву (б)

Figure 2. Application plates with samples (a) and their installation in the soil (b)

Источник: собственные фотографии авторов

Source: the authors' own photographs



Рисунок 3. Апликационная пластина спустя 50 дней эксперимента

Figure 3. Application plate after 50 days of the experiment

Источник: собственная фотография авторов

Source: the authors' own photograph

После завершения экспозиции в почве образцы повторно кондиционировались в тех же условиях и затем взвешивались. После кондиционирования остатки почвы были аккуратно удалены с поверхности образцов кистью для последующего анализа. Таким образом исключается влияние изменения влажности образцов и наличие остатков почвы на результаты гравиметрического анализа.

Отдельное внимание было уделено оценке экологической безопасности применения ячеек, т. к. при варке целлюлозы используется щелочь. Кислотность волокнистой суспензии готовой ячейки равен 7,8, в связи с этим, в качестве биоиндикатора негативного воздействия на почвенную фауну были использованы дождевые черви рода *Allolobophora* [20]. Применение сетчатого ящика позволяло не препятствовать проникновению дождевых червей в используемые почвенные среды, поэтому оценка экологической безопасности оценивалась по наличию червей.

Все полученные результаты подвергались статистическому анализу с использованием стандартного программного обеспечения Microsoft Office Excel 2021, StatPlus.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе наблюдений в первые 20 суток изменений не наблюдалось, но единично замечены

дождевые черви в каждом ящике. С 20 суток наблюдались начальные признаки изменения структуры поверхности, выражающиеся в её незначительном размягчении и повышении шероховатости, но при этом не было выявлено существенных изменений в образцах. Активное разложение образцов началось с 30 по 50 сутки. К концу опыта (50-е сутки) отмечалась значительная биодegradация образцов, отличающаяся от их первоначального состояния: кромки образцов, становились менее чёткими, поверхность приобретала более рыхлый и неоднородный характер (рис. 3). На этом этапе все пластины были извлечены из почв. Гравиметрический анализ, проведенный после экспозиции образцов в почве, выявил высокую степень биодegradации целлюлозных материалов (рис. 4). Данные представлены в таблице 1. Усредненная степень разложения образцов из композиции 1 составила 87 %, тогда как для композиции 2 этот показатель достиг 84 %. Наибольшая степень деструкции для обоих типов материалов наблюдалась в торфоземельной смеси (94 % и 95 % соответственно), тогда как наименьшие значения зафиксированы для композиции 1 в компосте (80 %) и для композиции 2 в почве из-под ельника черничного (69 %).

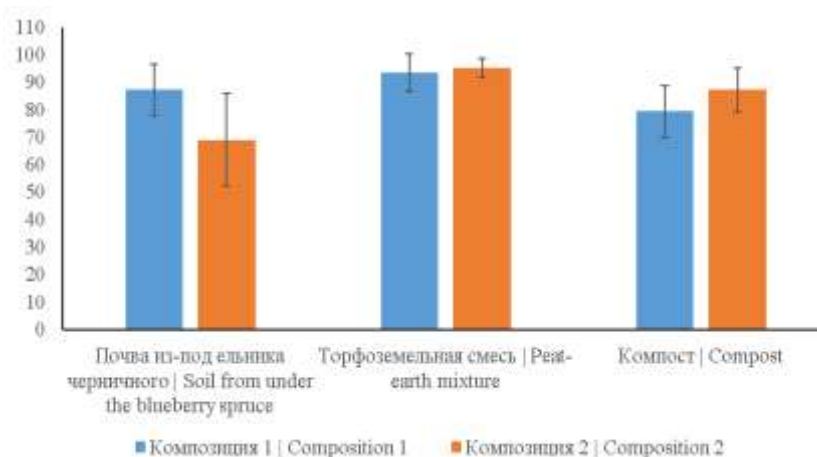


Рисунок 4. Средняя доля разложения целлюлозных композиций в различных почвенных субстратах после 50 суток экспозиции

Figure 4. Average proportion of decomposition of cellulose composites in various soil substrates after 50 days of exposure

Источник: собственные исследования авторов
Source: authors' own research

Для оценки скорости биодegradации провели расчет описательной статистики данных по доле разложения образцов. Полученные уравнения регрессии, демонстрируют, что среднее время, необходимое для полного разложения образцов, составляет 57 суток для композиции 1 и 59 суток для композиции 2. Следует учитывать, что полученные уравнения регрессии являются упрощёнными вследствие ограничения числом экспериментальных точек. В связи с этим прогноз полного разложения следует рассматривать как ориентировочный.

Полученные данные в целом коррелируют с данными JP. Juanga-Labayen, и Q. Yuan (2021) [19] в которых авторы отмечают, что биоразлагаемые горшки, применяемые для рассады, разложились более чем на 50 % в течение 45 дней эксперимента. Эти результаты подтверждают возможность полной биодegradации изделий данного назначения. Прямое сопоставление с полученными в настоящей работе результатами затруднено в связи с различиями в составе материалов, объемами изделий и условиями их эксплуатации.

Таблица 1

Статистические характеристики потери по доле разложения целлюлозных композиций

Table 1

Statistical characteristics of the loss by percentage of decomposition of cellulose compositions

Композиция 1 Composition 1			
Показатели Indicators	Вид субстрата Type of substrate		
	Почва из-под ельника черничного Soil from under the blueberry spruce	Компост Compost	Торфоземельная смесь Peat-earth mixture
Средняя доля разложения, % Average decomposition rate, %	87	80	94
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	0,09	0,09	0,07
Коэффициент вариации, % Ratio variations, %	11	12	7
Стандартная ошибка среднего Standard error of the average	0,03	0,03	0,02
Медиана The median	0,91	0,81	0,95

Уравнение регрессии The regression equation	$y = -1,7862x + 100$	$y = -1,6168x + 100$	$y = -1,9125x + 100$
Расчетный период разложения ячеек, дней Estimated period of cell decomposition, days	56	62	52
Композиция 2 Composition 2			
Средняя доля разложения, % Average decomposition rate, %	69	87	95
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	0,17	0,08	0,04
Коэффициент вариации, % Ratio variations, %	24	9	3
Стандартная ошибка среднего Standard error of the average	0,05	0,02	0,01
Медиана The median	0,72	0,86	0,96
Уравнение регрессии The regression equation	$y = -1,4313x + 100$	$y = -1,7903x + 100$	$y = -1,9463x + 100$
Расчетный период разложения ячеек, дней Estimated period of cell decomposition, days	70	56	51

Примечание: x – период разложения, день; y – относительная масса образцов, %

Note: x – decomposition period, day; y – relative mass of the samples, %

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных показал:

- для композиции 1 средние значения доли разложения демонстрируют близкий уровень биоразложения в разных типах почв (80-94 %), что подтверждается низкими коэффициентами вариации (7-12 %) и незначительным разбросом данных вокруг среднего (стандартная ошибка 0,02-0,03);

- для композиции 2 наблюдается большая вариабельность результатов, особенно в почве из-под ельника черничного (коэффициент вариации 24 %), тогда как в других типах почв данные более однородны (коэффициент вариации 3-9 %).

Различия в скорости биодegradации в исследованных субстратах могут быть обусловлены их физико-химическими и биологическими характеристиками. Торфоземельная смесь, как правило, отличается более высокой влагоёмкостью и аэрацией, а также повышенным содержанием органического вещества, что создаёт благоприятные условия для развития микробиоты, участвующей в разложении целлюлозы. В компосте высокая скорость разложения может быть связана с активной

микробиологической деятельностью. Почва из-под ельника черничного характеризуется более кислой средой и меньшей доступностью легкоразлагаемых микроорганизмов, что может замедлять процесс деструкции целлюлозных материалов.

Полученные результаты по биодegradации образцов в целом согласуются с литературными данными, согласно которым целлюлозные материалы, включая бумагу и картон, характеризуются высокой способностью к биодegradации [6, 7, 12, 14, 15, 18, 19].

Для статистической оценки полученных результатов был применен t-критерий Стьюдента. Сравнение степени дegradации двух типов материалов внутри каждого типа почвы показало наличие статистически значимых различий ($p < 0,05$) во всех трех случаях. Данные представлены в таблице 2. Это подтверждает, что тип целлюлозной композиции оказывает значимое влияние на скорость ее биодegradации в конкретном почвенном субстрате. Это указывает на различия в структуре и составе исследуемых материалов.

Таблица 2

Достоверность различий степени дegradации материалов в зависимости от почвенного субстрата

Table 2

Reliability of differences in the degree of degradation of materials depending on the soil substrate

Вид субстрата Substrate type	Число степеней свободы Number of degrees of freedom	Значение критического t-критерия при $p < 0,05$ The value of the critical t-test at $p < 0,05$	Критерий Стьюдента (рассчитанный) Student's t-test (calculated)
--------------------------------	---	--	---

Естественные науки и лес

Почва из-под ельника черничного Soil from under the blueberry spruce	24	2,064	6,06
Торфоземельная смесь Peat-earth mixture	25	2,060	8,39
Компост Compost	24	2,064	3,48

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Сравнительный анализ деградации одного типа материала в разных типах почв выявил более сложную зависимость. Значения представлены в таблице 3. Для образцов из композиции 1 не обнаружено статистически значимой разницы между степенью разложения в почве из-под ельника черничного и в компосте, а также между почвой из-

под ельника черничного и торфоземельной смесью. В то же время различия между степенью разложения в торфоземельной смеси и компосте являются статистически значимыми. Для композиции 2 статистически значимые различия были выявлены только при сравнении степени деградации в почве из-под ельника черничного и в компосте.

Таблица 3

Достоверность различий степени деградации целлюлозных композитов в разных почвенных условиях

Table 3

Reliability of differences in the degree of degradation of cellulose composites under different soil conditions

Материал Material	Число степеней свободы Number of degrees of freedom	Сравниваемые виды субстратов Comparable types of substrates	Значение критического t-критерия при $p < 0,05$ The value of the critical t-test at $p < 0,05$	Критерий Стьюдента (рассчитанный) Student's t-test (calculated)
Композиция 1 Composition 1	24	Почва из-под ельника черничного и компост Soil from under a blueberry spruce forest and compost	2,064	0,87
	25	Почва из-под ельника черничного и торфоземельная смесь Soil from under a blueberry spruce forest and a peat soil mixture	2,060	1,09
	23	Торфоземельная смесь и компост Peat soil mixture and compost	2,069	2,10
Композиция 2 Composition 2	24	Почва из-под ельника черничного и компост Soil from under a blueberry spruce forest and compost	2,064	2,32
	24	Почва из-под ельника черничного и торфоземельная смесь Soil from under a blueberry spruce forest and a peat soil mixture	2,064	0,78
	26	Торфоземельная смесь и компост Peat soil mixture and compost	2,056	2,04

Источник: собственные вычисления авторов Source: own calculations

В период проведения опыта, нами обнаружено постоянное присутствие дождевых червей. В конце опыта при извлечении пластин количество их на каждый вегетационный сосуд варьировалось от 15 до 20 шт. Визуальная оценка поведения червей рода *Allolobophora* и их состояния в течение всего периода эксперимента показала отсутствие каких-либо признаков стресса: черви сохраняли нормальную подвижность, не наблюдалось их миграции к поверхности почвы. Данный факт свидетельствует о том, что в условиях проведенного эксперимента разлагающиеся образцы из композиций 1 и 2 не оказывали негативного воздействия на почвенную фауну. Следует отметить, что данный вывод основан на качественной оценке и требует дальнейшего подтверждения с использованием количественных методов анализа состояния почвенных сред. Полученный результат может рассматриваться, как аргумент в пользу экологической безопасности материала для его применения в целях лесовосстановления.

Заключение

Установлено, что оба материала демонстрируют высокую скорость биodeградации в естественных почвенных условиях, достигая в среднем 87 % и 84 % потери массы. Прогнозируемое время их полного разложения не превышает двух месяцев и носит оценочный характер, поскольку основано на ограниченном числе экспериментальных точек. Статистический анализ подтвердил, что тип целлюлозной композиции является значимым фактором, влияющим на скорость процесса в каждой конкретной почве. Наибольшая активность разложения наблюдалась в торфоземельной смеси.

В ходе эксперимента с использованием дождевых червей в качестве биоиндикаторов не было выявлено визуально наблюдаемых признаков негативного воздействия разлагающихся образцов на почвенную фауну. При этом данный вывод основан на качественной оценке и требует дополнительного подтверждения с применением количественных методов исследования.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и выборе биоразлагаемых кассет для выращивания семян, предназначенных для последующего применения в технологии индустриального лесовосстановления. Использование таких изделий позволяет потенциально сократить образование трудноутилизуемых пластиковых отходов, снизить нагрузку на систему переработки отходов и повысить экологическую устойчивость технологического цикла выращивания посадочного материала.

Таким образом, полученные данные демонстрируют, что биоразлагаемые кассеты представляют собой перспективную альтернативу пластиковым кассетам, позволяя устранить образование долговременных отходов. Результаты работы свидетельствуют о возможности использования как композиции на основе сучковой массы, так и композиции ПЦ и ЦВВ для производства биоразлагаемых кассет. Применение данных кассет, обеспечивая быстрое и полное разложение, делает их целесообразными для использования при искусственном лесовосстановлении.

Список литературы

1. Kibria M., Masuk N., Safayet R., Nguyen H., Mourshed M. Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. *International Journal of Environmental Research*. 2023; 17(20): 1-37. – DOI: 10.1007/s41742-023-00507-z.
2. Ярославов А.А., Аржаков М.С., Хохлов А.Р. Жизненный цикл полимерного материала: проблемы и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. – 2022. – Т. 92. – С. 15-22. – DOI: 10.31857/S086958732201011X.
3. Meera R., Gaurav P., Kumud P., Becky A., Gaurav K., Harikesh S., Vishal T. Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability. *Resources*, 2023; 12(6): 67. – DOI: 10.3390/resources12060067.
4. Mrityika D., Roman S., Lokendra P., Martin H. Molded Pulp Products for Sustainable Packaging: Production Rate Challenges and Product Opportunities. *BioResources*. 2022; 17(2): 3810-3870. – DOI: 10.15376/biores.17.2.Debnath.
5. Zhang Y., Duan C., Bokka S. K., He Z. Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2022; 7(1): 16-19. – DOI: 10.1016/j.jobab.2021.10.003.
6. Joines M., Akpan S., Ibuot A. Bioconversion of waste paper into soil conditioner and its effect on plants growth and microbial population of the soil. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2020; 07(01): 227-233. – DOI: 10.30574/wjarr.2020.7.1.0233.

7. Santos J., Noletto A., Azeredo H., Carvalho R., Silva C., Yoshida C. Bio-based multilayer paperboard for sustainable packaging application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023; 140: 37. – DOI: 10.1002/app.54415.
8. Vikman M., Mikkelsen A., Rautkoski H. The impact of lignin content on the biodegradation of virgin paper pulps in soil and marine environment. *BioResources*. 2024; 19(2): 2452-2465. – DOI: 10.15376/biores.19.2.2452-2465.
9. Stocker C.W., Wong V.N.L., Patti A.F., Garnier G. Effect of lignin in cellulose nanofibers on biodegradation and seed germination. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024; 11(15): 1-11. –DOI: 10.1186/s40538-023-00528-y.
10. Kwon S., Meza L., Pawlak J., Venditti R. Effect of paper-making additives on biodegradation of lignocellulosic fibers. *BioResources*. 2024; 19(4): 8028-8043. – DOI: 10.15376/biores.19.4.8028-8043.
11. Hubbe M., Daystar J., Venditti R., Pawlak J., Zambrano M., Barlaz M., Ankeny M., Pires S. Biodegradability of cellulose fibers, films, and particles: a review. *BioResources*. 2025; 20: 2391-2458. – DOI: 10.15376/biores.20.1.Hubbe.
12. Ibzhanova A., Niyazbekova R., Azzam K., Negim E., Serepayeva M., Akibekov O. Biodegradability of Non-wood Packaging Paper. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2022; 65: 131-139. – DOI: 10.21608/EJCHEM.2022.110548.5033.
13. Poluszyńska J., Ciesielczuk T., Biernacki M., Paciorkowski M. The effect of temperature on the biodegradation of different types of packaging materials under test conditions. *Journal article*. 2021; 47: 1-10. – DOI: 10.24425/aep.2021.139503.
14. Erdal N., Hakkarainen M. Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments. *Biomacromolecules*. 2022; 23: 2713-2729. – DOI: 10.1021/acs.biomac.2c00336.
15. Dolci G., Intiliasano M., Fava F., Venturelli V., Malpei F., Grosso M. Degradation of paper-based boxes for food delivery in composting and anaerobic digestion tests. *Bioresource Technology*. 2024; 408: 131212. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131212.
16. Somsesta N., Chamamporn C., Wongsopanakun N., Sonaka P., Hongrattanavichit I. Surface-coated paper packaging with nanocellulose modified with quaternary ammonium organosilane and precipitated calcium carbonate for improved water repellency and antibacterial activity. *Scientific Reports*. 2025; 15(1): 25723. – DOI: 10.1038/s41598-025-10306-5.
17. Дзюин А. Г. Влияние соломы в сочетании с минеральными, органическими и сидеральными удобрениями на биологическую активность почвы // *Агрехимия*. – 2022. – С.72-79. – DOI: 10.31857/S0002188122110059.
18. Amuah E., Fei-Baffoe B., Sackey L., Douti N., Kazapoe R. A review of the principles of composting: understanding the processes, methods, merits, and demerits. *Organic Agriculture*. 2022; 12: 547-562. – DOI: 10.1007/s13165-022-00408-z.
19. Juanga-Labayen J., Yuan Q. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots. *Journal Environ Res Public Health*. 2021; 18(14): 7609. – DOI: 10.3390/ijerph18147609.
20. Дрочкова А.А. Применение экологически безопасных препаратов для стимуляции всхожести семян и роста сеянцев *Pinus sylvestris* L: специальность 4.1.6 «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Дрочкова Анна Алексеевна; Северный Арктический Федеральный Университет Им. М.В. Ломоносова. – Архангельск, 2025. – 123 с. – Библиогр.: с. 90-108. – Текст: непосредственный.

References

1. Kibria M., Masuk N., Safayet R., Nguyen H., Mourshed M. *Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management*. *International Journal of Environmental Research*. 2023; 17(20): 1-37. – DOI: 10.1007/s41742-023-00507-z.
2. Yaroslav A.A., Arshakov M.S., Hohlov A.R. *Shizheniy chick polymernogo materiaka: problemi i perspektivy* [Life cycle of polymeric materials: problems and prospects] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 92: 15-22. – DOI: 10.31857/S086958732201011X.
3. Meera R., Gaurav P., Kumud P., Becky A., Gaurav K., Harikesh S., Vishal T. *Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability*. *Resources*, 2023; 12(6): 67. – DOI: 10.3390/resources12060067.
4. Mrittika D., Roman S., Lokendra P., Martin H. *Molded Pulp Products for Sustainable Packaging: Production Rate Challenges and Product Opportunities*. *BioResources*. 2022; 17(2): 3810-3870. – DOI: 10.15376/biores.17.2.Debnath.

5. Zhang Y., Duan C., Bokka S. K., He Z. *Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review*. Journal of Bioresources and Bioproducts. 2022; 7(1): 16-19. – DOI: 10.1016/j.jobab.2021.10.003.
6. Joines M., Akpan S., Ibuot A. *Bioconversion of waste paper into soil conditioner and its effect on plants growth and microbial population of the soil*. World Journal of Advanced Research and Reviews. 2020; 07(01): 227-233. – DOI: 10.30574/wjarr.2020.7.1.0233.
7. Santos J., Noletto A., Azeredo H., Carvalho R., Silva C., Yoshida C. *Bio-based multilayer paperboard for sustainable packaging application*. Journal of Applied Polymer Science. 2023; 140: 37. – DOI: 10.1002/app.54415.
8. Vikman M., Mikkelsen A., Rautkoski H. *The impact of lignin content on the biodegradation of virgin paper pulps in soil and marine environment*. BioResources. 2024; 19(2): 2452-2465. – DOI: 10.15376/biores.19.2.2452-2465.
9. Stocker C.W., Wong V.N.L., Patti A.F., Garnier G. *Effect of lignin in cellulose nanofibers on biodegradation and seed germination*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2024; 11(15): 1-11. –DOI: 10.1186/s40538-023-00528-y.
10. Kwon S., Meza L., Pawlak J., Venditti R. *Effect of paper-making additives on biodegradation of lignocellulosic fibers*. BioResources. 2024; 19(4): 8028-8043. – DOI: 10.15376/biores.19.4.8028-8043.
11. Hubbe M., Daystar J., Venditti R., Pawlak J., Zambrano M., Barlaz M., Ankeny M., Pires S. *Biodegradability of cellulose fibers, films, and particles: a review*. BioResources. 2025; 20: 2391-2458. – DOI: 10.15376/biores.20.1.Hubbe.
12. Ibzhanova A., Niyazbekova R., Azzam K., Negim E., Serepayeva M., Akibekov O. *Biodegradability of Non-wood Packaging Paper*. Egyptian Journal of Chemistry. 2022; 65: 131-139. – DOI: 10.21608/EJCHEM.2022.110548.5033.
13. Poluszyńska J., Ciesielczuk T., Biernacki M., Paciorkowski M. *The effect of temperature on the biodegradation of different types of packaging materials under test conditions*. Journal article. 2021; 47: 1-10. – DOI: 10.24425/aep.2021.139503.
14. Erdal N., Hakkarainen M. *Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments*. Biomacromolecules. 2022; 23: 2713-2729. – DOI: 10.1021/acs.biomac.2c00336.
15. Dolci G., Intilisan M., Fava F., Venturelli V., Malpei F., Grosso M. *Degradation of paper-based boxes for food delivery in composting and anaerobic digestion tests*. Bioresource Technology. 2024; 408: 131212. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131212.
16. Somsesta N., Chamamporn C., Wongsopanakun N., Sonaka P., Hongrattanavichit I. *Surface-coated paper packaging with nanocellulose modified with quaternary ammonium organosilane and precipitated calcium carbonate for improved water repellency and antibacterial activity*. Scientific Reports. 2025; 15(1): 25723. – DOI: 10.1038/s41598-025-10306-5.
17. Dzyin A. G. *Vliyaniye solomy v sochetanii s mineralnymi, jrganycheskimi I sideralnymi ydobreniyami na biologicheskuyu aktivnost pochvy* [The influence of straw in combination with mineral, organic and green manure fertilizers on the biological activity of the soil]. Agrochemistry. 2022; 72-79. (In Russ). DOI: 10.31857/S0002188122110059.
18. Amuah E., Fei-Baffoe B., Sackey L., Douti N., Kazapoe R. *A review of the principles of composting: understanding the processes, methods, merits, and demerits*. Organic Agriculture. 2022; 12: 547-562. – DOI: 10.1007/s13165-022-00408-z.
19. Juanga-Labayen J., Yuan Q. *Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots*. Journal Environ Res Public Health. 2021; 18(14): 7609. – DOI: 10.3390/ijerph18147609.
20. Drochkova A.A. *Primenenie ekologicheskii bezopasnykh preparatov dlya stimulyachii vshoshesti semyan I rosta seyanchev Pinus sylvestris L* [Use of environmentally friendly preparations to stimulate seed germination and growth of Pinus sylvestris L seedlings]: specialty 4.1.6 «Forestry, silviculture, forest crops, agroforestry, landscaping, forest pyrology and taxation»: dissertation for the degree of candidate of agricultural sciences / Drochkova Anna Alekseevna; Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov. – Arkhangelsk, 2025. – 123 p. – Bibliography: p. 90-108. – Text: direct.

Сведения об авторах

✉ *Агадуллин Данил Ринатович* – соискатель (лаборант), ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>, e-mail: agadullindan@yandex.ru.

Естественные науки и лес

Гурьев Александр Владиславович – кандидат т.-х наук, заместитель начальника научно-исследовательского управления, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, e-mail: a.guriev@narfu.ru.

Лебедева Ольга Петровна – старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, зав. лабораторией клонального микроразмножения растений и экспериментальной гидропоники, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Danil R. Agadullin* – applicant (laboratory worker), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>, e-mail: agadullindan@yandex.ru.

Aleksandr V. Guriev – candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Research Department, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, e-mail: a.guriev@narfu.ru.

Olga P. Lebedeva – senior lecturer, Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Head of the Laboratory of Clonal Micropropagation of Plants and Experimental Hydroponics, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author