

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>

УДК 631.632



## Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению семян с закрытой корневой системой из ячейки кассеты

Кристина Н. Черник<sup>1</sup>✉, [k.n.chernik@mail.ru](mailto:k.n.chernik@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Сергей Г. Елисеев<sup>1</sup>, [s-555s@yandex.ru](mailto:s-555s@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация

Лесовосстановительные работы, в том числе с сеянцами с закрытой корневой системой характеризуются высокой трудоемкостью и энергозатратами. В настоящее время посадка сеянцев с закрытой корневой системой осуществляется вручную или с использованием лесопосадочных машин, агрегируемых с тракторами, где оператор подает сеянцы в посадочный аппарат. При использовании автоматических агрегатов на манипуляторах харвестеров или экскаваторов сеянцы также извлекаются вручную, что указывает на зависимость от человеческого фактора и слабые места технологии. Актуальность исследования заключается в разработке автоматизированной системы подачи сеянцев. Объектом исследования данной научной работы является процесс извлечения сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек кассет. Предмет исследования – усилие, возникающее при извлечении сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек. Цель работы – определение усилия, возникающего во время извлечения сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек кассет при заданных условиях, необходимого для разработки автоматизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат. В процессе работы проводилось исследование влияния параметров корневой системы сеянца на величину усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки. Исследование проводилось на базе универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У, где измерение усилия в процессе извлечения сеянца из ячейки каждого опыта осуществлялось и записывалось в реальном времени. Результаты исследования: выполнен расчет усилия при извлечении сеянца из ячейки с использованием прикладной математической программы Mathcad; получена зависимость величины усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки от параметров корневой системы; экспериментально определено максимальное и минимальное значение усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки. Полученные результаты, в дальнейшем, будут использованы для оптимизации подбора исполнительных элементов разрабатываемой автоматизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат.

**Ключевые слова:** лесовосстановление, автоматизация, лесопосадочная машина, сеянец, закрытая корневая система, лесопосадочный аппарат

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Черник К.Н. Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению сеянцев с закрытой корневой системой из ячейки кассеты / К.Н. Черник, С.Г. Елисеев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 138-153. – Библиогр.: с. 150-153 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>.

Поступила 23.12.2024. Пересмотрена 14.02.2025. Принята 04.03.2025. Опубликовано онлайн 24.03.2025.

## Experimental studies to determine the maximum effort to extract containerized tree seedling from a cassette cell

Kristina N. Chernik<sup>1</sup>✉, k.n.chernik@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Sergey G. Eliseev<sup>1</sup>, s-555s@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

### Abstract

Reforestation works, including those with containerized tree seedling, are characterized by high labor and energy consumption. Currently, planting containerized tree seedling is carried out manually or with the use of forest planting machines aggregated with tractors, where the operator feeds the seedlings into the planting machine. When using automatic units on manipulators of harvesters or excavators, seedlings are also extracted manually, indicating the dependence on human factor and weaknesses of the technology. The relevance of the research is to develop an automated seedling feeding system. The object of study of this research paper is the process of extracting containerized tree seedling from the cells of cassettes. The subject of the study is the force arising during the extraction of containerized tree seedling from the cells. The aim of the work is to determine the force arising during the extraction of a containerized tree seedling from the cells of cassettes under given conditions, necessary for the development of an automated system for feeding seedlings into the planting machine. In the process of work, the influence of the parameters of the containerized tree seedling on the amount of force required to extract the seedling from the cell was investigated. The study was conducted on the basis of the universal testing machine UTS-110MN-30-0U, where the measurement of force during the process of seedling extraction from the cell of each experiment was carried out and recorded in real time. Results of the study: the calculation of the effort required to extract the seedling from the cell using Mathcad applied mathematical program was performed; the dependence of the amount of effort required to extract the seedling from the cell on the parameters of the root system was obtained; the maximum and minimum value of the effort required to extract the seedling from the cell was determined experimentally. The obtained results will be further used to optimize the selection of actuating elements of the developed automated system of seedling feeding into the planting unit.

**Keywords:** *reforestation, automation forest, planting machine, seedling, containerized tree seedling, forest planting machine.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Chernik K.N., Eliseev S.G. (2025). Experimental studies to determine the maximum effort to extract containerized tree seedling from a cassette cell. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 138-153 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>

*Received* 23.12.2024. *Revised* 14.02.2025. *Accepted* 04.03.2025. *Published online* 24.03.2025.

### Введение

Проблемы и вызовы современного лесного хозяйства в значительной степени связаны с необходимостью удовлетворения растущих потребностей

населения Земли в древесине, используемой для производства множества потребительских товаров [1]. Кроме того, существует необходимость внедрения принципов устойчивого лесного производства,

которые обеспечат безопасность работников, поддержат экологический баланс и гарантируют достаточный уровень производительности [2,3]. Реализация этих принципов может быть достигнута путем широкого внедрения автоматизации и роботизации производственных процессов в лесном хозяйстве, особенно для задач, требующих ручного труда, таких как посадка семян с закрытой корневой системой (ЗКС) при искусственном лесовосстановлении.

Анализ существующих устройств и машин, используемых для посадки семян с ЗКС, показывает, что в основном используются простые ручные инструменты и классические сажалки, агрегируемые с сельскохозяйственными тракторами [4]. Есть также несколько машин, предлагающих определенный уровень автоматизации посадки, особенно в аспекте посадки семян с ЗКС [5-15]. Однако, эти устройства все еще требуют значительного количества ручных операций, таких как перемещение семян из контейнеров в накопители, из которых они затем собираются автоматическими системами для посадки в почву [16-20]. Польскими инженерами разработан прототип мобильного автоматического устройства для выполнения задач по лесовосстановлению (RoboFoR). Основной задачей этого транспортно-технологического комплекса является посадка семян с закрытой корневой системой, которые в процессе лесопосадки извлекаются непосредственно из кассет для выращивания ЗКС [21]. В Швеции разработана автоматическая система подачи семян MagMat для посадочного устройства Bracke. MagMat вмещает 320 ед. посадочного материала в восьми кассетах для выращивания. Устройство еще не находится в коммерческом производстве, но, как сообщают зарубежные исследователи, оценки и анализ рабочего времени показали, что MagMat может обеспечить существенное повышение производительности процесса и снизить стоимость работ по лесовосстановлению [22].

В целях повышения производительности механизированной посадки Risutec Ltd. и UPM Forest разработали автоматическую кассету для подачи семян Risutec APC, которая вмещает более 1200 семян и прикреплена к одноблочному посадочному устройству. Финские специалисты отмечают, что Risutec APC еще предстоит оценить, но

можно предположить, что производительность аналогична производительности Bracke P11.a (от 324 до 355 семян в час) с меньшим временем, затрачиваемым на перезарядку кассеты. Сеянцы загружаются по лоткам, избавляя оператора от необходимости вручную загружать их по одному [22].

В течение нескольких лет шведские ученые работали над проектом Autoplant. Концепция проекта включает в себя несколько подсистем, а именно: восстановление и планирование маршрута, автономное вождение (планирование пути), новую технологию восстановления леса с минимальным воздействием на окружающую среду, автоматическую подачу семян, планирование движения стрелы манипулятора с рабочим органом, обнаружение мест посадки и последующее наблюдение. Шведские ученые отмечают, что Autoplant может решить проблемы, связанные с будущим развитием, например, соотношение между стоимостью машины и рабочей скоростью, надежностью датчиков в ответ на вибрации и погодные условия, а также точностью определения размера и типа препятствий во время автономного вождения и посадки [23].

Исходя из вышеизложенного следует, что эффективность механизированной посадки определяется эффективностью подачи семян в лесопосадочный аппарат. При разработке механизма, автоматической подачи семян из кассеты в лесопосадочный аппарат, одним из важных параметров является усилие, возникающее при извлечении семени из ячейки кассеты. Поэтому целью данного исследования является определение усилия, возникающего во время извлечения семян с ЗКС из ячеек кассет при заданных условиях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить составляющие усилия, возникающего во время извлечения семян из ячеек; провести расчет усилия извлечения семени; провести натурные испытания с последующим анализом результатов.

### Материалы и методы

Измерение усилия, возникающего во время извлечения семян с ЗКС из ячеек кассет, проводилось в июне 2024 г. с применением универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У. В качестве объекта исследования использовались сеянцы

1-летней сосны обыкновенной с ЗКС, выращенные в специальных кассетах для хвойных деревьев. Семена сеянцев были посеяны 18.05.2023 г. На момент испытания сеянцы имели высоту от 15 до 25 см, диаметр корневой шейки варьировался в пределах от 2,1 до 2,9 мм. Кассета для сеянцев с ЗКС изготовлена из полипропилена. Основные характеристики кассеты: Д×В×Ш (мм) кассеты: 385×385×73, размер ячейки (мм): 41×41×73, объем ячейки (см<sup>3</sup>): 85, количество ячеек: 81, вес кассеты 970 г (рис. 1).



Рисунок 1 - Кассета с сеянцами  
Figure 1 - Cassette with seedlings

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Захват корневой шейки осуществлялся разработанным в программе КОМПАС 3D и напечатанным на 3D принтере захватным устройством (рис. 2). Площадь рабочей поверхности пластин захвата была подобрана таким образом, чтобы обеспечить достаточное трение без критических повреждений корневой шейки при извлечении сеянца.



Рисунок 2 – Захватное устройство для сеянцев с ЗКС.

1 – втулка-крепление; 2 – основание захвата; 3 – прижимная пластина; 4 – пружина; 5 – регулировочная пластина; 6 – направляющие.

Figure 2 – Gripping device for containerized tree seedling

1 – fastening sleeve; 2 – gripper base; 3 – pressure plate; 4 – spring; 5 – adjustment plate; 6 – guides.

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Чтобы минимизировать влияние силы трения покоя на величину усилия извлечения сеянца из ячейки использовались напечатанные на 3D принтере толкатели высотой 5, 10 и 15 мм, позволяющие предварительно частично извлечь сеянец из ячейки (рис. 3).

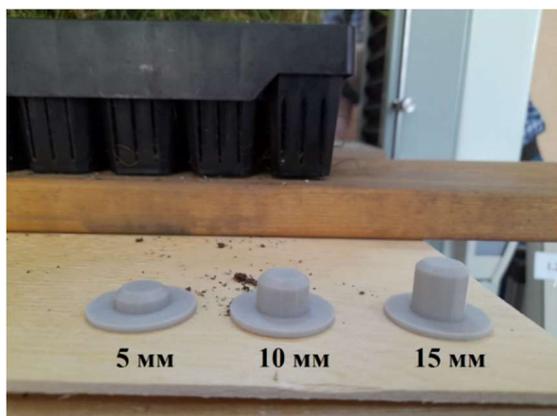


Рисунок 3 – Толкатели для частичного извлечения сеянцев из ячейки

Figure 3 – Pushers for partial extraction of seedlings from the cell

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Для записи результатов испытаний использовалось стандартное программное обеспечение, используемое при работе испытательной машины УТС-110МН-30-0У и USB флэш-накопитель. Машина работала в режиме Испытание «Растяжение» с постоянной скоростью перемещения подвижной траверсы.

Испытания осуществлялись в следующем порядке:

1. Захватное устройство для сеянцев с ЗКС устанавливалось с помощью втулки-крепления на подвижную траверсу универсальной испытательной машины.

2. Кассета с сеянцами помещалась на специальный столик, который закреплялся на неподвижной траверсе таким образом, чтобы захват находился над крайним рядом ячеек кассет.

3. При проведении опыта с использованием толкателей разного размера, производилась установка толкателя до упора в круглое центральное отверстие, расположенное на дне ячейки.

4. С помощью цифрового дисплея универсальной испытательной машины устанавливались требуемые параметры для проведения испытаний.

5. Захват устанавливался у основания корневой шейки, усилие удержания сеянца регулировалось с помощью регулировочной пластины.

6. Захват, закрепленный на траверсе испытательной машины, поднимал сеянцы на высоту

100 мм с постоянной скоростью равной 500 мм/мин. В процессе извлечения сеянцев из кассеты испытательная машина строила график зависимости усилия ( $F$ , Н) от перемещения ( $L$ , мм).

7. После извлечения захватом первого крайнего ряда сеянцев, производилось перемещение столика с кассетой на величину равную одному ряду для извлечения следующего ряда сеянцев.

8. Полученные данные выводились на цифровой дисплей в виде графиков и таблицы с массивом данных, и сохранялись для дальнейшего анализа, в названии файла указывался номер опыта.

Поскольку при извлечении сеянца из кассеты, корни, вышедшие за пределы ячейки, создают дополнительное сопротивление, которое необходимо учитывать при проектировании полностью автоматизированных комплексов для посадки сеянцев с ЗКС возникла необходимость в исследовании влияния наличия корневой системы за пределами ячеек кассет. Корни, застревающие в вертикальных технологических отверстиях (направляющих), подвергаются растяжению, в связи с этим, помимо других сил, возникают продольные силы корней, которые необходимо учитывать при моделировании процесса извлечения сеянцев.

Исходя из этого в процессе извлечения сеянцев из ячеек кассет возникают следующие силы: сила трения покоя, сила тяжести сеянца и продольные силы корней, зацепившихся за ячейку кассеты при вытягивании. В случае, если движение сеянца неравномерное, добавляется сила инерции. На рис. 4 представлена схема извлечения сеянца из ячейки кассеты.

В начальный момент времени извлечения сеянца действует сила трения покоя:

$$F_{mp} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения кома почвы о стенки кассеты;

$m$  - масса сеянца, кг;

$\alpha$  - угол между стенкой ячейки и горизонталью.

При этом,

$$\alpha = \arctg \left( \frac{2h_k}{a_1 - a_2} \right), \quad (2)$$

где  $h_k$  – высота кома почвы сеянца, мм;

$a_1$  – ширина верхнего основания кома почвы, мм;

$a_2$  – ширина нижнего основания кома почвы, мм.

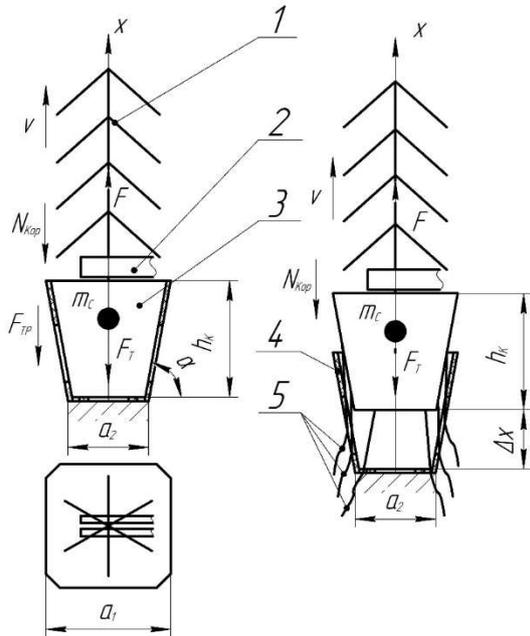


Рисунок 4 – Схема извлечения сеянца с ЗКС из ячейки кассеты.

1 – сеянец; 2 – захватное устройство; 3 – ком почвы; 4 – ячейка кассеты; 5 – корни сеянца

Figure 4 – Scheme of extracting a containerized tree seedling a cassette cell.

1 – seedling; 2 – gripping device; 3 – soil lump; 4 – cassette cell; 5 – seedling roots

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Усилие  $N_{kop}$  изменяется в процессе извлечения сеянца из ячейки и зависит от количества корней, застрявших в полостях ячеек и подвергнувшихся растяжению, их диаметров и текущей величины напряжения каждого корня.

Текущее значение продольной силы одного корня, оказывающего сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определяли по формуле:

$$N_i = A_i \cdot \sigma_i \quad (3)$$

где  $A_i$  – площадь поперечного сечения корня, м<sup>2</sup>;

$\sigma_i$  – напряжение, возникающее в корне при растяжении.

Суммарное текущее значение продольных сил корней, оказывающих сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определялось по формуле:

$$N_{kop} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sigma_i \quad (4)$$

где  $n$  – количество корней, оказывающих сопротивление движению сеянца в текущий момент времени.

Эмпирическим путем было установлено, что диаметр корней, вышедших за пределы ячейки, варьируется в пределах от 0,40 до 0,85 мм (рис. 5).



Рисунок 5 – Корни, вышедшие за пределы ячейки кассеты

Figure 5 – Roots extending beyond the cell of the cassette

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Исходя из того, что в процессе извлечения сеянца из кассеты величина суммарного усилия, возникающего от продольных сил корней, носит случайный характер, не представлялось возможным точно описать данный процесс теоретически. Поэтому было принято решение определить зависимость величины усилия извлечения сеянца из ячейки от количества корней, одновременно испытывающих предельные напряжения при различных значениях их диаметров.

Усилие, необходимое для извлечения сеянцев из ячейки определялось по следующей формуле:

$$F_{II} = F_{TP} + F_T + N_{kop} + F_i, \quad (5)$$

где  $F_T$  – сила тяжести сеянца, Н;

$F_i$  – сила инерции сеянца, Н. При равномерном прямолинейном движении  $F_i = 0$ .

Средняя масса сеянцев определялась на основе данных, полученных от красноярского лесничества по формуле:

$$m_c = \frac{m_o - m_k}{n_y} \quad (6)$$

где  $m_o$  – общая масса кассеты с сеянцами, кг;

$m_k$  – масса пустой кассеты, кг;

$n_y$  – количество ячеек в кассете.

Для получения экспериментальных значений усилия, необходимого для извлечения сеянца из кассеты под воздействием управляемых факторов, необходимо было провести серию опытов. В этих целях была разработана матрица планирования эксперимента, основными факторами в которой выступили: обрезка корней на дне кассеты и высота толкателя (табл. 1). Определение необходимого числа повторностей опытов  $n$  осуществлялась по стандартной методике [25].

Для определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней применялась следующая методика [24]. На точные весы устанавливалась с помощью специальных скоб металлическая пластина весом 1,5 кг для обеспечения запаса датчика весов при «отрицательном» взвешивании. Один конец корня длиной 10 см закреплялся на цилиндрический стержень диаметром 2 мм, который фиксировался к точным весам с помощью канцелярского скотча, а за другой конец тянули вверх перпендикулярно плоскости рабочей поверхности весов, предварительно обнулив показания весов, при этом велась видеозапись показаний на экране весов (рис. 6). В процессе натяжения корня при определенном усилии происходит разрыв. По видеозаписи определялась максимальная масса в момент разрыва корня. По полученной массе определялось усилие. Предельные напряжения определялись по формуле (3). После проведения ряда испытаний было получено среднее значение предельных напряжений.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Table 1

Experimental Design Matrix

№ опыта  № experience	Факторы  Factors		Показатель цели  Goal indicator
	Обрезка корней (да, нет)  Root pruning (yes, no)	Высота толкателя, мм  Height of the pusher, mm	Максимальное усилие извлечения сеянца из ячейки, Н  Maximum force for extracting a seedling from a cell, N
1.n	да  yes	0	F <sub>1</sub>
2.n	нет  no	0	F <sub>2</sub>
3.n	да  yes	5	F <sub>3</sub>
4.n	нет  no	5	F <sub>4</sub>
5.n	да  yes	10	F <sub>5</sub>
6.n	нет  no	10	F <sub>6</sub>
7.n	да  yes	15	F <sub>7</sub>
8.n	нет  no	15	F <sub>8</sub>

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

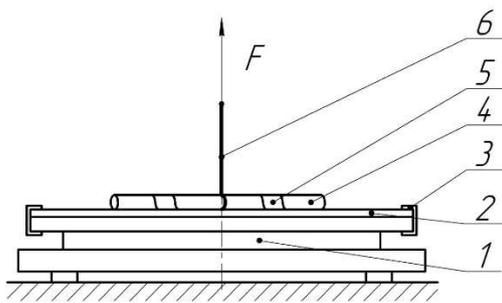


Рисунок 6 – Схема определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней.

1 – весы; 2 – металлическая пластина; 3 – крепежные скобы; 4 – цилиндрический стержень; 5 – канцелярский скотч, 6 – корень.

Figure 6 – Scheme for determining the ultimate stresses arising from root extension.

1 – scales; 2 – metal plate; 3 – fastening brackets; 4 – cylindrical rod; 5 – office tape, 6 – root.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Для автоматизации расчётов по определению усилия, необходимого для извлечения сеянцев с ЗКС из ячейки кассеты, было использовано программное обеспечение MatchCAD (рис. 7).

Расчет усилия при вытаскивании сеянца

$m := 61 \cdot 10^{-3}$  масса сеянца, кг  
 $g := 9.81$  ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  
 $\alpha := 85 \text{ deg}$  угол между стенкой кассеты и горизонталью, град  
 $\mu := 0.5$  коэффициент трения  
 $D := 0.8 \cdot 10^{-3}$  диаметр корня, м  
 $\sigma_{pr} := 6.122 \cdot 10^6$  предельные напряжения корней при растяжении, Па  
 $a := 0$  ускорение, м/с<sup>2</sup>  
 $n := 6$  количество корней, шт

Площадь сечения, м<sup>2</sup>

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 5.027 \times 10^{-7}$$

Сила трения покоя, Н

$$F_{tr} := \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 0.026$$

Усилие сопротивления корней в момент разрыва, Н

$$N_{kor} := A \cdot \sigma_{pr} \cdot n = 18.464$$

Сила тяжести, Н

$$F_t := m \cdot g = 0.598$$

Сила инерции, Н

Сила вытягивания сеянца из ячейки, Н

$$F_j := m \cdot a = 0$$

$$F_c := F_{tr} + N_{kor} + F_t + F_j = 19.088$$

Рисунок 7 – Расчет усилия при вытаскивании сеянца из ячейки

Figure 7 – Calculation of the force when pulling a seedling out of a cell

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

## Результаты

В соответствии с описанной методикой определения суммарного значения продольных сил корней были проведены исследования по результатам которых были получены зависимости усилия вытягивания сеянца от количества около предельно нагруженных корней при различных значениях их диаметров (рис. 8).

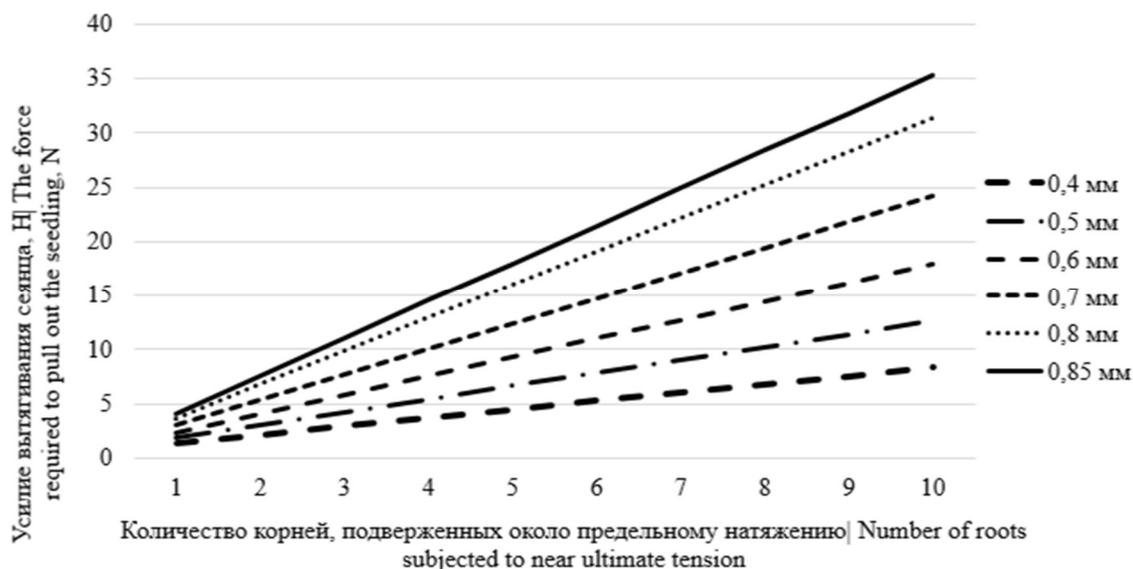


Рисунок 8 – График зависимостей усилия извлечения сеянца от количества корней, подверженных около предельным напряжениям

Figure 8 – Graph of the dependence of the seedling extraction force on the number of roots subjected to near-limit stresses

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

При проведении исследований по извлечению сеянцев из ячеек кассет был проведен предварительный эксперимент для определения необходимого числа повторностей опытов. Определение величины усилия по извлечению сеянца из кассеты осуществлялось в соответствии с ранее описанной методикой с использованием универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У. Результаты обработки эксперимента представлены в табл. 2. Значение критерия Стьюдента (t-критерия) определялось по табличным значениям, при доверительной вероятности 0,95 и числу степеней свободы, равному 7 [25].

Таблица 2  
Результаты обработки предварительного эксперимента

Table 2  
Results of processing the preliminary experiment

Параметр  Parameter	Значение  Magnitude
Среднее арифметическое значение выборки, $\bar{y}$   Arithmetic mean of the sample	19,9
Количество опытов, n   Number of experiments	8
Выборочная дисперсия, $s^2$   Sample variance	2,28
Среднее квадратичное отклонение, $s$   Standard deviation	1,51
Вариационный коэффициент, $\nu$   Variation coefficient	7,57
Значение критерия Стьюдента при P=0,95; f=7   The meaning of the Student's criterion	2,3

Ошибка среднего арифметического, $m$   Error of the arithmetic mean	$\pm 1,265$
Расчетный критерий Стьюдента при крайнем верхнем отклонении, $t_{py_{max}}$   Student's t-test	1,364
Расчетный критерий Стьюдента при крайнем нижнем отклонении, $t_{py_{min}}$   Student's t-test	1,748

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

В результате анализа предварительного эксперимента расчетные критерии Стьюдента при крайних положениях оказались ниже табличного

значения, то есть  $t_{py_i} < t$ , следовательно, количество повторностей для проведения эксперимента выбрано достаточное.

С учетом полученных предварительных данных была проведена серия экспериментов по извлечению семян из ячеек кассет в соответствии с описанной методикой и матрицей планирования эксперимента, представленной в табл. 1. По результатам проведенных исследований были получены зависимости усилия извлечения семени из ячейки от перемещения последнего для каждого опыта (рис. 9) и максимальные значения усилия при извлечении семян (табл. 3, рис. 10).

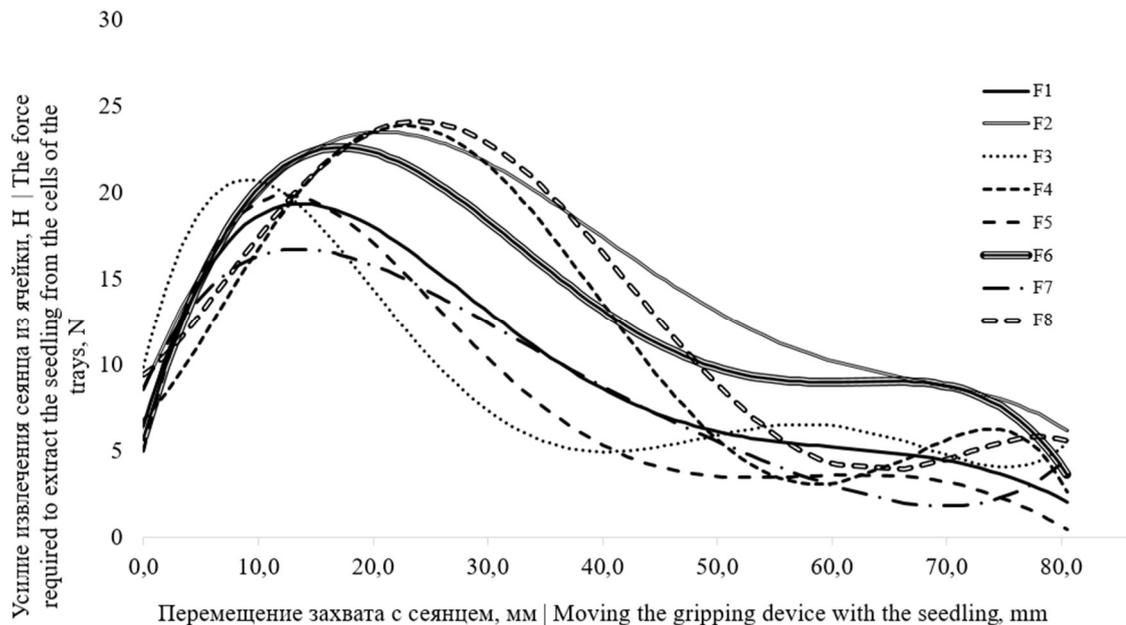


Рисунок 9 – Изменение усилия извлечения семени из ячейки в зависимости от предварительной подготовки  
 Figure 9 – Change in the force required to extract a seedling from a cassette cell depending on preliminary preparation

Источник: Собственная композиция авторов  
 Source: authors' composition

Результаты обработки эксперимента с обрезкой корней, без толкателя

Table 3

Results of processing the experiment with root pruning, without a pusher

№ опыта  Experience No.	Среднее пиковое значение с доверительным интервалом, Н  Average peak value with confidence interval	Количество повторностей, n  Number of repetitions	Выборочная дисперсия  Sample variance	Среднквадратическое отклонение  Standard deviation	Коэффициент вариации  Coefficient of variation	Точность опыта, %  Accuracy of experience
1.n	20,48±1,217	8	1,48	1,217	5,94	4,98
2.n	22,60±1,053	8	1,58	1,257	5,69	4,77
3.n	18,73±0,936	8	1,32	1,149	6,13	4,997
4.n	23,90±1,019	8	1,48	1,217	5,09	4,27
5.n	17,83±0,881	8	1,23	1,109	6,22	4,94
6.n	22,57±1,096	8	1,71	1,308	5,79	4,86
7.n	16,56±0,814	8	1,19	1,09	6,59	4,92
8.n	24,10±1,115	8	1,77	1,330	5,52	4,63

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

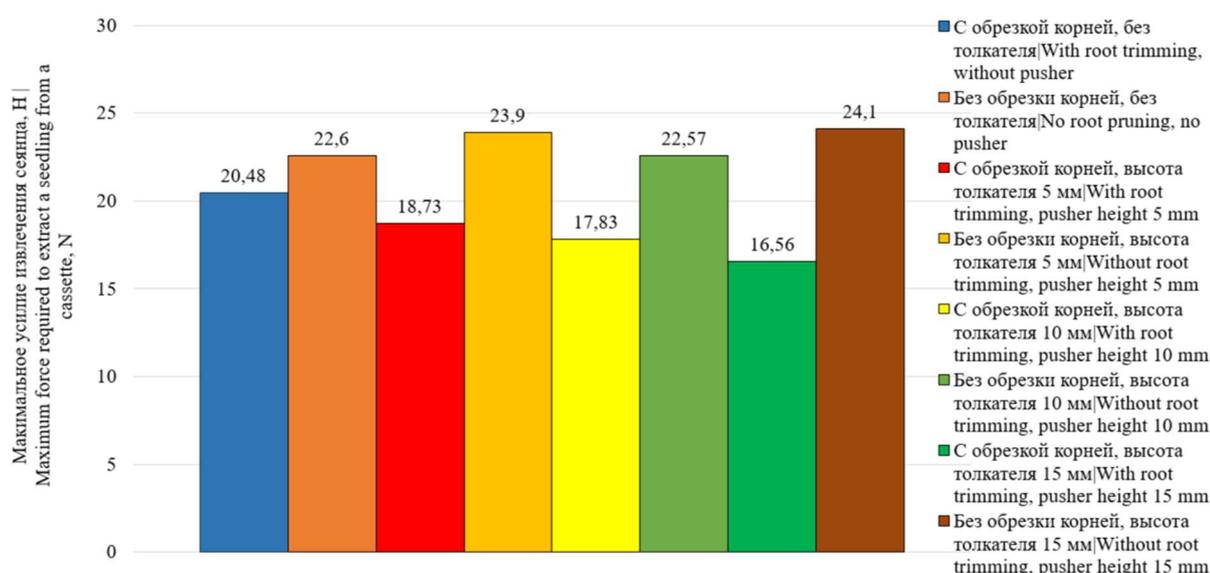


Рисунок 10 – Максимальные значения усилий извлечения сеянцев из ячеек

Figure 10 – Maximum values of force required to extract seedlings from the cells of the cassettes

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

### Обсуждение

Согласно графику изменения усилия извлечения сеянца из ячейки в зависимости от представленной подготовки (рис. 10) минимальное значение усилия извлечения сеянца возникает в том случае,

когда в процессе извлечения сеянца один корень с минимальным диаметром подвержен около предельному растяжению и величина этого усилия составляет 1,39 Н. Максимальное значение усилия возникает в случае, когда 10 корней с максимальным

диаметром одновременно подвержены около предельному растяжению, величина усилия составляет 35,36 Н, при этом сила тяжести и сила трения покоя в совокупности не превышают 2 % от общей силы.

Анализ данных показал, что при обрезке корней (F1, F3, F5, F7) пиковое значение усилия извлечения сеянца смещается к началу координат абсцисс и находится в пределах от 8,8 до 13,8 мм, а без обрезки корней (F2, F4, F6, F8) пиковые значения смещаются ближе к середине координаты перемещения захвата в пределах от 16,7 до 23,0 мм. Это объясняется тем, что часть необрезанных корней, застревая в технологических отверстиях, помимо растягивания проскальзывают и исходя из этого общее пиковое сопротивление возникает несколько позже, чем у обрезанных корней. При этом характер у всех кривых примерно одинаковый.

В серии опытов с применением толкателей, но без обрезки корней значимого влияния высоты толкателя зафиксировано не было. Это подтверждает, что сила трения, возникающая в начальный момент времени при движении сеянца ничтожно мала в сравнение с сопротивлением корней сеянцев.

Согласно данным представленным в таблице 3 и на рисунке 10 наибольшие значения усилия, необходимого для извлечения сеянцев из ячеек, приходится на вариант эксперимента без обрезки корней с толкателем высотой 15 мм – 24,1 Н. Наименьшее значение усилия наблюдается при максимальном значении высоты толкателя и предварительной обрезки корней сеянцев – 16,56 Н, что меньше наибольшего значения на 31 %. Применение 5 мм толкателя с обрезкой корней обеспечивает снижение усилия извлечения на 8,5 % с 20,48 до 18,73 Н, а использование 10 мм толкателя снижает усилие почти на 13 % до 17,83 Н. В тоже время как применение толкателей без обрезки корней, оказалось неэффективным. Усилие извлечения сеянцев в этом случае не только не уменьшалось, но и имело тенденцию к увеличению. При применении толкателя 15 мм в среднем усилие увеличивалось с 22,6 Н до 24,1, Н. А применение 5 и 10 мм толкателей без обрезки корней вообще не имело достоверных различий изменения усилия в сравнении с сеянцами, извлеченными без толкателей. В целом эксперименты

с варьированием высоты толкателя при необрезанных с внешней стороны дна кассеты корнях показали, что использование толкателей из-за защемления корней не оказывает существенного влияния на величину максимального усилия извлечения сеянца из ячейки. При этом использование толкателей высотой более 15 мм приводило к значительному наклону стебля сеянца от его начального положения, что усложняет позиционирование захватного устройства при извлечении сеянца и может привести к его повреждению.

Помимо определения максимального усилия при извлечении сеянцев из кассет оценивалось и их состояние. После каждого испытания производился визуальный осмотр стволиков сеянцев в месте их фиксации зажимом на предмет повреждения. По итогам серии испытаний, повреждения стволиков сеянцев и разрушения кома сеянцев после извлечения зафиксированы не были. В дальнейшем сеянцы были высажены на территории университета и показали практически 100 % приживаемость.

### Заключение

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на величину усилия извлечения сеянца из ячейки оказывает продольная сила корней. В то время, как сила трения и тяжести сеянца суммарно составляют незначительную величину (до 4,3 %) от общего усилия, основное влияние оказывает продольная сила корней. Обрезка корней и использование толкателей позволяют обеспечить снижение максимального усилия при извлечении сеянца более чем на 30 %. При этом использование толкателей без обрезки корней нецелесообразно, поскольку не обеспечивается снижение усилия извлечения сеянца, а в некоторых случаях, наоборот, увеличивает.

2. Обрезка корней позволяет снизить усилие извлечения сеянца из ячейки кассеты с 22,6 Н до 20,48 Н, а с добавлением толкателя высотой 15 мм - до 16,56 Н. При разработке автоматизированной системы подачи сеянцев из кассеты в посадочный аппарат необходимо обеспечить усилие: без обрезки корней, без толкателей – 22,6 Н; с обрезкой корней и с толкателем максимальной высоты – 16,56 Н.

Во втором случае к процессу добавляются две дополнительные операции: обрезка корней и выталкивание сеянцев из ячеек кассеты. При этом следует отметить, что для исполнительного органа машины разность между максимальным и минимальным значениями не существенна.

3. Исходя из полученных результатов, для автоматизированного извлечения сеянцев из кассет

нет необходимости добавлять операции в технологический процесс, такие как обрезка и предварительное выталкивание кома из ячеек, поскольку сеянцы не получают повреждений при извлечении и без подготовительных операций, а разность максимального и минимального усилия извлечения сеянца из ячейки не существенна для машины.

### Список литературы

1. Sobocki S., Adamczyk F., Tylek P., Szaroleta M., Zurowski K., Kormanek M., Szewczyk G., Tabor S., Zwierzyński M., Kaźmierczak M. A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *Forests*, 2023; 14(12): 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
2. Sobocki S., Wojciechowski J., Legutko S., Mac J., Zawada M., Szymczyk S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021), Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
3. Angelstam P., Bush T., Manton M. Challenges and Solutions for Forest Biodiversity Conservation in Sweden: Assessment of Policy, Implementation Outputs, and Consequences. *Land*, 2023; 12: 1098. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12051098>
4. Драпалюк М. В., Стасюк В.В., Зеликов В.А. Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой. *Лесотехнический журнал*. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 112–123. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
5. Manner J., Ersson B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci*, 2021; 67: 242–246. DOI: <https://doi.org/10.17221/203/2020-JFS>
6. Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*, 2021; 22(2): 25–32. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e64233>
7. Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Curr. Forestry Rep*, 2020; 6: 143–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
8. Soler R.R., Guerra S.P.S., Oguri G., Rodrigues S.A. Economic Evaluation and Performance of a Tree Planting Machine Performing in Two Different Slope Classes and Conditions of Harvesting Slash. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024; 45(1). DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2209>
9. Khoza M.J., Ramantswana M.M., Spinelli R., Magagnotti N. Enhancing Silvicultural Practices: A Productivity and Quality Comparison of Manual and Semi-Mechanized Planting Methods in KwaZulu-Natal, South Africa. *Forests*, 2024; 15: 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15112045>
10. Liang J., Sawut M., Cui J., Hu X., Xue Z., Zhao M., Zhang X., Rouzi A., Ye X., Xilike A. Object-oriented multi-scale segmentation and multi-feature fusion-based method for identifying typical fruit trees in arid regions using Sentinel-1/2 satellite images. *Scientific Reports*, 2024; 14(1): 18230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68991-7>
11. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14: 1039. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>
12. Wu X., Jiang Z., Zhang L., Hu X., Li W. Optimization Design and Experimentation of a Soil Covering Device for a Tree Planting Machine. *Agriculture*, 2024; 14(3): 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030346>
13. Ersson B.T., Sundblad L.-G., Manner J. Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: a case study from southern Sweden. *Silva Fennica*, 2022; 56(2): 10663. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10663>

14. Ghaffariyan M.R. An overview of work productivity evaluation of farm tractors in timber skidding operations. *Silva Balcanica*, 2022; 23(1): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e82383>
15. Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2021. – № 1 (379). – С. 138-149. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-138-149>
16. Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry — A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *Forest Ecology and Management*, 2023; 530: 120766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120766>
17. Zelikov V.A., Kadali B.R., Stasyuk V.V., Kazachek M.N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020; 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012065>
18. Sikstrom U., Hjelm K., Holt H.K., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 2020; 54(2): 10172. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10172>
19. Turunen M.T., Rasmus S., Järvenpää J., Kivinen S. Relations between forestry and reindeer husbandry in northern Finland – Perspectives of science and practice. *Forest Ecology and Management*, 2020; 457: 117677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117677>
20. Huuskonen S., Domisch T., Finér L., Hantula J., Hynynen J., Matala J., Miina J., Neuvonen S., Nevalainen S., Niemisto P., Nikula A., Piri T., Siitonen J., Smolander A., Tonteri T., Uotila K., Viiri H. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, 2021; 479: 118558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558>
21. Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Pietrzykowski M., Szewczyk G., Szychta M., Kielbasa P., Sobocki S., Danielak M., Juliszewski T. RoboFoR—Automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 2022; 6: 119–136. DOI: [https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9\\_7](https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_7)
22. Черник К.Н., Лозовой В.А. Анализ производительности машин дискретного действия, применяемых для механизированной посадки семян с закрытой корневой системой. *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 1. – С. 136-144. – DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp136-144>
23. Hansson L., Sten G., Rossander M., Lideskog H., Manner J., van Westendorp R., Li S., Eriksson A., Wallner A., Rönnqvist M. Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 2024; 15(2): 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020263>
24. Байдаев Д.М., Егорова Е.М., Фисун М.Н. Прочность на разрыв и якорность корневых систем древесно-кустарниковых растений в условиях высокогорий. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2006. – № 13. – С. 134-136. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23749465&ysclid=m6g4j5374n689194023>
25. Pruthi T., Srivastava N., Rana V., Kaushik N., Kaur N. Research methodology and design: A powerful tool for scientific data. *J Adv Med Dent Scie Res*, 2021; 9(11): 52-57. DOI: <https://doi.org/10.2176/jamdsr>

### References

1. Sobocki S., Adamczyk F., Tylek P., Szaroleta M., Zurowski K., Kormanek M., Szewczyk G., Tabor S., Zwierzyński M., Kaźmierczak M. A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *Forests*, 2023; 14(12): 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
2. Sobocki S., Wojciechowski J., Legutko S., Mac J., Zawada M., Szymczyk S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021)*, Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>

3. Angelstam P., Bush T., Manton M. Challenges and Solutions for Forest Biodiversity Conservation in Sweden: Assessment of Policy, Implementation Outputs, and Consequences. *Land*, 2023; 12: 1098. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12051098>
4. Drapalyuk M.V., Stasyuk V.V., Zelikov V.A. *Novye konstrukcii universal'nyh lesoposadochnyh mashin dlya posadki seyancev s otkrytoj i zakrytoj kornevoj sistemoj* [New designs of universal planting machines for planting seedlings with an open and closed root system]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry engineering magazine*, 2021; 11; 4 (44): 112–123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
5. Manner J., Ersson B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci*, 2021; 67: 242–246. DOI: <https://doi.org/10.17221/203/2020-JFS>
6. Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*, 2021; 22(2): 25-32. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e64233>
7. Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Curr. Forestry Rep*, 2020; 6: 143–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
8. Soler R.R., Guerra S.P.S., Oguri G., Rodrigues S.A. Economic Evaluation and Performance of a Tree Planting Machine Performing in Two Different Slope Classes and Conditions of Harvesting Slash. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024; 45(1). DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2209>
9. Khoza M.J., Ramantswana M.M., Spinelli R., Magagnotti N. Enhancing Silvicultural Practices: A Productivity and Quality Comparison of Manual and Semi-Mechanized Planting Methods in KwaZulu-Natal, South Africa. *Forests*, 2024; 15: 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15112045>
10. Liang J., Sawut M., Cui J., Hu X., Xue Z., Zhao M., Zhang X., Rouzi A., Ye X., Xilike A. Object-oriented multi-scale segmentation and multi-feature fusion-based method for identifying typical fruit trees in arid regions using Sentinel-1/2 satellite images. *Scientific Reports*, 2024; 14(1): 18230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68991-7>
11. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14: 1039. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>
12. Wu X., Jiang Z., Zhang L., Hu X., Li W. Optimization Design and Experimentation of a Soil Covering Device for a Tree Planting Machine. *Agriculture*, 2024; 14(3): 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030346>
13. Ersson B.T., Sundblad L.-G., Manner J. Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: a case study from southern Sweden. *Silva Fennica*, 2022; 56(2): 10663. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10663>
14. Ghaffariyan M.R. An overview of work productivity evaluation of farm tractors in timber skidding operations. *Silva Balcanica*, 2022; 23(1): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e82383>
15. Gerc Je.F., Mehrencev A.V., Pobedinskij V.V. *Povyshenie jeffektivnosti mul'tifunktional'nyh mashin dlja vedenija intensivnogo lesnogo hozjajstva* [Improving the efficiency of multifunctional machines for intensive forestry]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2021; 1(379): 138-149. (In Russ.). DOI: [10.37482/0536-1036-2021-1-138-149](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-138-149)
16. Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry — A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *Forest Ecology and Management*, 2023; 530: 120766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120766>
17. Zelikov V.A., Kadali B.R., Stasyuk V.V., Kazachek M.N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020; 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012065>
18. Sikstrom U., Hjelm K., Holt H.K., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 2020; 54(2): 10172. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10172>

19. Turunen M.T., Rasmus S., Järvenpää J., Kivinen S. Relations between forestry and reindeer husbandry in northern Finland – Perspectives of science and practice. *Forest Ecology and Management*, 2020; 457: 117677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117677>
20. Huuskonen S., Domisch T., Finér L., Hantula J., Hynynen J., Matala J., Miina J., Neuvonen S., Nevalainen S., Niemisto P., Nikula A., Piri T., Siitonen J., Smolander A., Tonteri T., Uotila K., Viiri H. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, 2021; 479: 118558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558>
21. Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Pietrzykowski M., Szewczyk G., Szychta M., Kiełbasa P., Sobocki S., Danielak M., Juliszewski T. RoboFoR—Automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 2022; 6: 119–136. DOI: [https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9\\_7](https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_7)
22. Chernik K.N., Lozovoy V.A. *Analiz proizvoditel'nosti mashin diskretnogo dejstviya, primenyaemyh dlya mekhanizirovannoy posadki seyancev s zakrytoj kornevoj sistemoy* [Performance analysis of a discrete-action machine used for mechanized planting of seedlings with a closed root system]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2024; 1: 136-144. (In Russ.) DOI: 10.28983/asj.y2024i1pp136-144.yu
23. Hansson L., Sten G., Rossander M., Lideskog H., Manner J., van Westendorp R., Li S., Eriksson A., Wallner A., Rönnqvist M. Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 2024; 15(2): 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020263>
24. Baidaev D.M., Egorova E.M., Fisun M.N. *Prochnost' na razryv i yakornost' kornevykh sistem drevесno-kustarnikovyyh rasteniy v usloviyah vysokogorij* [Tensile strength and anchorage of root systems of trees and shrubs in highland conditions]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex*, 2006; 13: 134-136. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23749465&ysclid=m6g4j5374n689194023>
25. Pruthi T., Srivastava N., Rana V., Kaushik N., Kaur N. Research methodology and design: A powerful tool for scientific data. *J Adv Med Dent Scie Res*, 2021; 9(11): 52-57. DOI: <https://doi.org/10.2176/jamdsr>

### Сведения об авторах

✉ Черник Кристина Николаевна – аспирант кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>, k.n.chernik@mail.ru.

Елисеев Сергей Геннадьевич – кандидат техн. наук, директор института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, s-555s@yandex.ru.

### Information about the authors

✉ Kristina N. Chernik – Post-Graduate Student, Department of Composite Materials Technology and Wood Science, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>, k.n.chernik@mail.ru.

Sergey G. Eliseev – Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, s-555s@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding auth