

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>

УДК 630\*323.12



## Исследование эколого-экономических параметров работы машины Mounty-4000 на первичной транспортировке древесины в Республике Болгария

Сотир П. Глушков<sup>1</sup>, [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg) <https://orcid.org/0000-0002-9089-417X>

Димитр И. Бояджиев<sup>1</sup>, [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-5716-0169>

Александр С. Черных<sup>2</sup>, [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Петр И. Попиков<sup>2</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Дмитрий Н. Афоничев<sup>3</sup>, [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

Виталий В. Абрамов<sup>2</sup> , [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8779-076X>

Денис А. Полукаров<sup>2</sup>, [aviatortut@mail.ru](mailto:aviatortut@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-5914-4928>

Станислав И. Савченко<sup>2</sup>, [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

<sup>1</sup>Институт лесоводства Болгарской академии наук, бульвар Кл. Охридски, 132, г София, 1756, Болгария

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В статье проведен анализ работы современной техники для выполнения первичной транспортировки древесины в горной местности, показавший перспективу использования мобильных канатных установок на базе грузовых автомобилей, оснащённых кареткой с дистанционным управлением, а также манипулятором с процессорной головкой для выполнения обработки деревьев или хлыстов, сортировки сортиментов и их погрузки на лесовозный транспорт. Целью представленной работы стало проведение теоретических и экспериментальные исследований эколого-экономических параметров работы Mounty 4000 на первичной транспортировке древесины в горной местности. В ходе проведенных теоретических исследований была проведена структуризация цикла работы «горного процессора» и в результате получена математическая зависимость затрат на ее эксплуатацию. По каждой составляющей времени цикла в ходе производственного эксперимента в условиях горной местности Болгарии были получены законы распределения и статистические характеристики их продолжительностей. Гипотеза нормальности распределения была подтверждена критерием Пирсона при заданном уровне значимости  $p=0.05$ . В ходе имитационного эксперимента была установлена зависимость повреждаемости оставляемых на лесосеке стволов деревьев от интенсивности рубки, густоты насаждения и расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната на трассе установки. Определен уровень значимости основных факторов влияния на общие затраты (по интенсивности рубки  $\beta/\alpha= 0,67$ ; ширине пасеки  $\beta/\alpha= 0,74$ ; запасу леса  $\beta/\alpha= 0,84$ ) и повреждаемость деревьев (по интенсивности рубки  $\beta/\alpha= 0,95$ ; запасу леса  $\beta/\alpha= 1,0$ ; ширине пасеки  $\beta/\alpha= 1,52$ ). Определены значения благоприятных областей наиболее значимых факторов влияния при уровне повреждаемости деревьев  $C_2$  ниже требуемых нормативов - 12 %. Результаты проведенных исследований рекомендуется использовать на стадии проектирования лесосечных работ для комплексной оценки функционирования техники с экономических и экологических позиций. Для этого разработана программа для ЭВМ «Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок» (свидетельство о государственной регистрации № 2023662656).

**Ключевые слова:** заготовка древесины, лесовосстановительные работы, горные леса, первичная транспортировка древесины, горные процессоры, мобильные канатные установки, экологический ущерб, лесоводственный результат рубки, средооадающие технологии лесосечных работ, технико-экономическая эффективность функционирования техники.

**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:** Исследование эколого-экономических параметров работы машины MOUNTY-4000 на первичной транспортировке древесины в Республике Болгария / С. П. Глушков, Д. И. Бояджиев, А. С. Черных, П. И. Попиков, Д. Н. Афоничев, В. В. Абрамов, Д. А. Полукаров, С. И. Савченко // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 144–167. – Библиогр.: с. 162–166 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>.

*Поступила* 18.03.2024. *Пересмотрена* 19.05.2024. *Принята* 23.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.

### Article

## Study of the environmental and economic parameters of the MOUNTY-4000 machine for primary wood transportation in the Republic of Bulgaria

Sotir P. Glushkov<sup>1</sup>, [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg)  <https://orcid.org/0000-0002-9089-417X>

Dimitar I. Boyadzhiev<sup>1</sup>, [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0001-5716-0169>

Alexander S. Chernykh<sup>2</sup>, [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Petr I. Popikov<sup>2</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Dmitry N. Afonichev<sup>3</sup>, [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

Vitaly V. Abramov<sup>2</sup> , [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-076X>

Denis A. Polukarov<sup>2</sup>, [aviatorfut@mail.ru](mailto:aviatorfut@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5914-4928>

Stanislav I. Savchenko<sup>2</sup>, [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

<sup>1</sup>*Institute of Forestry of the Bulgarian Academy of Sciences, 132 Kl. Ohridski Boulevard, Sofia, 1756, Bulgaria*

<sup>2</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I", Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russian Federation*

### Abstract

The article analyzes the operation of modern technology for the primary transportation of wood in mountainous areas, showing the prospect of using mobile rope installations based on trucks equipped with a remote-controlled carriage, as well as a manipulator with a processor head for processing trees or logs, sorting assortments and their loading onto timber transport. The purpose of the presented work was to conduct theoretical and experimental studies of the environmental and economic parameters of the operation of MOUNTY 4000 in the primary transportation of wood in mountainous areas. In the course of the theoretical studies, the operating cycle of the "mining processor" was structured and, as a result, a mathematical dependence of the costs of its operation was obtained. For each component of cycle time, during a production experiment in the mountainous conditions of Bulgaria, distribution laws and statistical characteristics of their durations were obtained. The hypothesis of normal distribution was confirmed by the Pearson test at a given significance level of  $p=0.05$ . During the simulation experiment, the dependence of the damageability of tree trunks left in the cutting

area on the intensity of felling, the density of the planting and the distance of pulling the timber under the line of the supporting rope along the installation route was established. The level of significance of the main factors influencing the total costs (for felling intensity  $\beta/\alpha=0.67$ ; apiary width  $\beta/\alpha=0.74$ ; forest stock  $\beta/\alpha=0.84$ ) and damage to trees (for felling intensity  $\beta/\alpha=0.95$ ; forest stock  $\beta/\alpha=1.0$ ; apiary width  $\beta/\alpha=1.52$ ). The values of favorable areas of the most significant influencing factors were determined when the level of damage to C2 trees is below the required standards - 12%. The results of the conducted research are recommended to be used at the design stage of logging operations for a comprehensive assessment of the functioning of equipment from economic and environmental positions. For this purpose, a computer program has been developed "Program for justifying the technology and system of logging machines" (certificate of state registration No. 2023662656).

**Keywords:** *timber harvesting, reforestation works, mountain forests, primary transportation of wood, mining processors, mobile rope installations, environmental damage, forestry result of logging, environmental-sparing technologies of logging operations, technical and economic efficiency of equipment functioning.*

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

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

**For citation:** Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Chernykh A. S., Popikov P. I., Afonichev D. N., Abramov V. V., Polukarov D. A., Savchenko S. I. (2024) Study of the environmental and economic parameters of the Mounthy-4000 machine for primary wood transportation in the Republic of Bulgaria. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 144-167 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>.

*Received* 18.03.2024. *Revised* 19.05.2024. *Accepted* 23.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

В настоящее время значительные запасы древесины во многих странах мира находятся на горных склонах. В Болгарии на долю горных лесов приходится 24 % территории, в России – более 40 %.

По данным И.В. Григорьева и др. (2024) [7], при выполнении лесозаготовительных работ в горной местности наблюдается снижение производительности труда, а также увеличение ущерба для окружающей среды. В результате растут затраты на выполнение лесосечных и лесовосстановительных работ.

В работах И.Р. Шегельмана (2020) [28] отмечается, что по сравнению с другими операциями на лесосеке первичная транспортировка древесины в наибольшей степени определяет экономический результат рубки и ее лесоводственно-экологические последствия. Очень многое здесь зависит от технологии, техники, схем и параметров разработки лесосек.

Р. Кавалли (2019) [21] отмечает, что применение трелевочных тракторов в горной

местности характеризуется значительными затратами, повреждениями лесной среды, а также ограничениями в работе по причине потери сцепления движителя с почвогрунтом и потери устойчивости при уклоне в 15...20 градусов. Исправить такую ситуацию, по мнению Р.В. Франциска (2019) [23], можно с помощью специальной лебедки, установленной на тракторе, и троса, закрепляемого за пни и деревья, расположенные впереди по ходу движения.

А.В. Абузов и др. (2019-2023) [1-4] считают, что в будущем использование летательных аппаратов аэростатного типа для трелевки в горных условиях увеличится. Это позволит нормализовать процесс получения ценной древесины и восстановления лесов основными породами без нарушения лесной среды, особенно почв. Однако при всех достоинствах применения аэростатов на лесозаготовках, есть и недостатки. Во-первых, ветреная погода, которая часто встречается в горной местности, может приводить к парусности аэростата и таким образом сильно ограничивать его применение. Во-вторых,

грузоподъемность аэростата будет уменьшаться с увеличением высоты разрабатываемых лесосек, так как воздух там будет становиться все более разреженным.

Работа вертолетов на лесозаготовках в меньшей степени зависит от направления и силы ветра относительно аэростатов. При этом с экологической точки зрения вертолеты являются наиболее предпочтительным вариантом для использования на горном склоне, так как их влияние здесь на экосистему минимально. Однако на сегодняшний день их применение ограничивает экономический фактор. Только эксплуатационные затраты по топливу при использовании вертолета на первичной транспортировке древесины в зависимости от режима его работы (без учета заработной платы пилотов и расходов на амортизацию) могут достигать по данным С.Е. Рудова и др. (2021) [11] более 80 тыс. рублей в час. Кроме этого, управление вертолетом на лесозаготовках в горной местности – это сложная работа, поэтому могут возникать сложности с поиском свободных пилотов самого высокого уровня.

Проблемами воздушной трелевки древесины занимаются также в США, Канаде, Швеции, Италии, Франции, Германии и Норвегии, где в отдаленных горных лесах находятся большие запасы ценной древесины. Особое внимание там, по данным Г.Эрбера (2021) [22], как и в России, уделяется технологиям, которые в наименьшей степени оказывают влияние на экологическую сторону горных лесозаготовок и являются экономически оправданными.

П.Б. Рябухин и др. (2019-2023) [13-15] считают, что применение мобильных канатных установок позволяет осуществлять разработку горных лесосек при больших уклонах местности с меньшим количеством повреждений основных компонентов леса, не уступая существенно тракторам по производительности. При этом особое внимание заслуживает вопрос обоснования расстояния между трассами канатных установок, так как от величины данного параметра зависят производственные затраты и лесоводственно-экологический результат рубки. Уменьшение расстояния между трассами канатных установок означает уменьшение расстояния для подтрелевки, которое на крутых участках приводит

к значительному уменьшению повреждений оставшимся на лесосеке деревьям, что означает большие доходы от использования леса в длительной перспективе. Повреждаемость деревьев выражается в обдирах коры на стволах в местах их контакта с вытягиваемыми с полупасек предметами труда (деревья, хлысты) или собирающими их канатами. Увеличение расстояния между трассами канатных установок, кроме роста повреждаемости деревьев будущего приводит к увеличению протяженности траекторий вытягивания предметов труда с пасеки, в результате площадь повреждаемости почвы растет. Кроме этого, с увеличением ширины разрабатываемой полупасеки в каждую сторону от трассы канатной установки становится труднее формировать пачку лесоматериалов для транспортировки. Это приводит к повышению усталости у рабочих, увеличению риска несчастного случая, а также необходимости выделения дополнительного работника для чокеровки.

В настоящее время в Европе наиболее распространены канатные установки для разработки горных лесов компании Konrad Forsttechnik GmbH. С.П. Глушков и др. (2021) [24] считают, что особое внимание у данного производителя заслуживают современные мобильные канатные установки на базе грузовых автомобилей, оснащенных манипулятором с процессорной головкой для выполнения обрезки деревьев от сучьев и раскряжевки хлыстов, а также сортировки сортиментов и их погрузки на лесовозный транспорт. Их принято называть «горные процессоры» (рис. 1). Данная техника может работать, как отдельно, так и совместно с трелевочными тракторами (рис. 2), если позволяет уклон местности. При этом, второй вариант для склонов большой крутизны (свыше 20 градусов) в настоящее время не приемлем с экологических позиций, так как требует предварительную нарезку террас с помощью бульдозера. Практика показывает, что террасы в дальнейшем могут стать источниками ветровой и водной эрозии почвы.

Основные достоинства применения «горных процессоров» на лесозаготовках заключаются в следующем: можно быстро и качественно заготавливать древесину на участках с очень крутыми склонами или низкой несущей способностью грунтов;

тяжелая, трудоемкая и опасная работа с бензопилами на обрабатываемых операциях (обрезка стволов деревьев от сучьев или раскряжевка хлыстов на сортименты) становится полностью механизированной в производственном процессе лесосечных работ благодаря использованию процессорной головки; производительность крана-процессора при среднем диаметре получаемого сортимента 27...28 см становится больше в 5...9 раз относительно применения бензомоторного инструмента в зависимости от вида транспортируемой древесины (дерева или хлысты) и технологии работы на погрузочном пункте (очистка сучьев с последующей раскряжкой или только раскряжка хлыстов на сортименты).

На сегодняшний день в Болгарии частные лесозаготовительные компании используют на горных лесосеках три такие машины марки Mounty 4000 с процессорной головкой Woody H60 (табл. 1). Результаты их работы во многом определяют: тип лесозаготовительного массива, форма склона (вогнутый, выпуклый, прямой), уклон местности, конфигурация и технологические параметры разрабатываемой лесосеки, таксационная характеристика насаждения, вид рубки и ее интенсивность, протяженность трассы и расстояние между ними. При

этом нормы циклового времени работы и нормы выработки в смену такой техники с учетом обозначенных факторов отсутствуют. Отсутствуют также данные по лесоводственно-экологическим последствиям применения этих машин в горных условиях лесосек.

В этой связи, для более широкого применения таких машин потребовалось исследование процесса их работы с целью достоверного прогнозирования общих затрат на первичную транспортировку древесины и повреждаемости лесной среды в условиях горной местности.

В соответствии с поставленной целью были обозначены следующие задачи:

1. Провести структуризацию цикла работы машины Mounty 4000 в горной местности и собрать данные в условиях производства, необходимые для прогнозирования прямых затрат на первичную транспортировку древесины.

2. Провести имитационный эксперимент для получения регрессионной зависимости повреждаемости деревьев, оставляемых на лесосеке от расстояния подтаскивания хлыстов под линию несущего каната, интенсивности рубки и густоты насаждения.



Рисунок 1. Машина Mounty 4000 с процессорной головкой WoodyH60

Figure 1. Mounty 4000 machine with WoodyH60 processor head

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

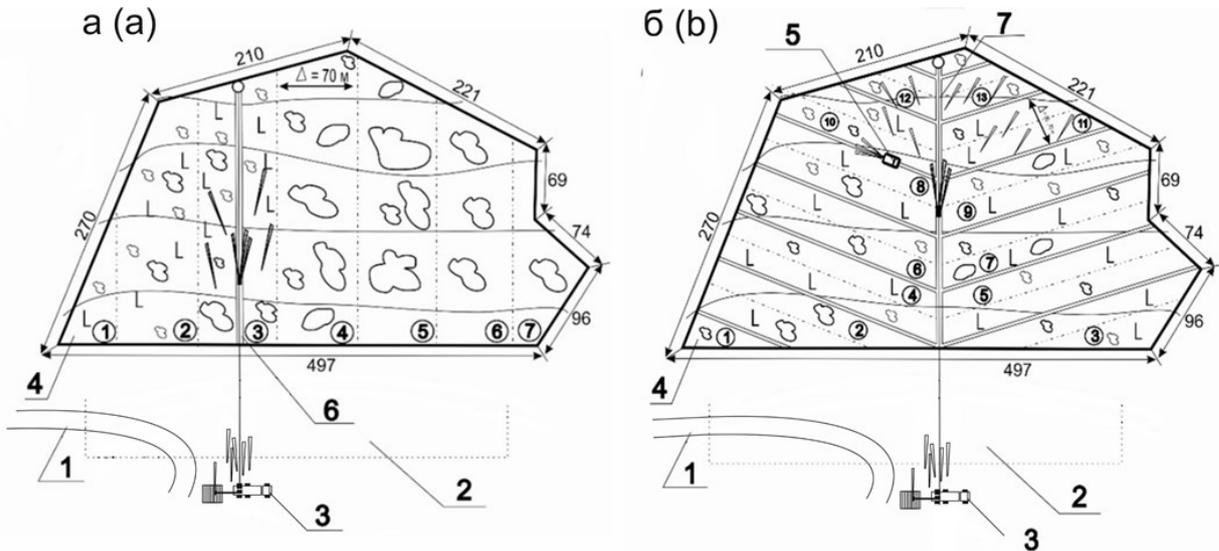


Рисунок 2. Технологические схемы разработки лесосек с прямым склоном в горной местности: а – отдельная работа горного процессора; б – совместная работа горного процессора в системе с трелевочным трактором

Figure 2. Technological schemes for the development of cutting areas with a straight slope in mountainous: а – work of the mining processor; б – operation of the mining processor and the skidding tractor

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Основные технические характеристики исследуемой машины Mounty 4000 с процессорной головкой Woody H60

Table 1

The main technical characteristics of the Mount 4000 machine under study with a Woody H60 processor head

Наименование   Name	Размерность   Dimension	Технические данные   Technical data
База машины   The base of the machine	-	MAN 33410
Колесная формула   Wheel formula	-	6x6
Колесная база   Wheelbase	м   m	3,2+1,38
Габаритные размеры (длина, ширина и высота)   Overall dimensions (length, width and height)	м   m	8,43x2, 55x3,71
Марка манипулятора   Brand of the manipulator	м   m	PENZ 20.80
Максимальный подъемный момент   Maximum lifting torque	кНм   kNm	200
Максимальный крутящий момент   Maximum torque	кНм   kNm	42
Вылет манипулятора   Departure of the manipulator	м   m	9,6
Общая масса   The total weight	т   t	25
Длина несущего троса   Length of the carrier cable	м   m	550
Диаметр несущего троса   Diameter of the carrier cable	м   m	0,02
Длина тягового каната   Length of the traction rope	м   m	650
Диаметр тягового каната   Diameter of the traction rope	м   m	0,012
Марка процессора   Processor brand	-	Woody H60
Диаметр обработки   Processing diameter	м   m	0,07...0,55
Мощность подачи   Feed capacity	кН   kN	24-30
Скорость подачи   Feed rate	м/с   m/s	0...5
Скорость резания   Cutting speed	м/с   m/s	40

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследований

Объектом исследования является процесс первичной транспортировки древесины машиной Mounty 4000 отдельно и в системе с трелевочными тракторами.

Предметом исследования являются эколого-экономические показатели функционирования машины Mounty 4000 в горной местности.

Для прогнозирования прямых производственных затрат на первичную транспортировку древесины машиной Mounty 4000 + WoodyH60 предложено использовать следующее выражение:

$$C_1 = \frac{C_{msm} M_j k_{изр} \sum_{i=1}^I T_i}{3600 V_p m \varphi} = \frac{C_{msm} k_{изр} M_j \left( T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} \right)}{3600 V_p m \varphi}, \quad (1)$$

где  $C_{msm}$  – себестоимость машино-смены Mounty 4000, руб;

$M_j$  – объем вырубаемой древесины вырубимый в  $j$ -ый прием рубки на разрабатываемой лесосеке, м<sup>3</sup>;

$k_{изр}$  – доля вырубаемого компонента леса;

$m$  – продолжительность смены, ч;  
 $\varphi$  – коэффициент использования времени смены;

$V_p$  – объем трелеваемой пачки, м<sup>3</sup>;

$T_i$  – продолжительность  $i$ -ой составляющей времени цикла первичной транспортировки древесины, с;

$I$  – число составляющих времени цикла первичной транспортировки;

$T_1$  – продолжительность подъема крюка к каретке, с;

$T_2$  – продолжительность движения каретки от рабочей площадки к месту формирования пачки хлыстов (деревьев, сортиментов), с;

$T_3$  – продолжительность опускания крюка от каретки к чоковерщику, с;

$T_4$  – продолжительность подтягивания крюка с тросом к месту зацепки хлыстов (деревьев, хлыстов, сортиментов), с;

$T_5$  – продолжительность чоковерки хлыстов (деревьев, сортиментов), с;

$T_6$  – продолжительность подтрелевки хлыстов (деревьев, сортиментов) к канатной трассе, с;

$T_7$  – продолжительность подъема хлыстов (деревьев, сортиментов) к каретке, с;

$T_8$  – продолжительность перемещения хлыстов (деревьев, сортиментов) по канатной дороге, с;

$T_9$  – продолжительность ожидания сигнала оператора об окончании обработки предметов труда из предыдущей партии, с;

$T_{10}$  – продолжительность опускания хлыстов (деревьев, сортиментов) на погрузочную площадку, с;

$T_{11}$  – продолжительность отцепки хлыстов (деревьев, сортиментов) на погрузочной площадке, с.

Для прогнозирования повреждаемости деревьев  $C_2$  на первичной транспортировке древесины при использовании машины Mounty 4000 + WoodyH60 потребовалось установление следующей зависимости

$$C_2 = f(N, l_n, k_{изр}), \quad (2)$$

где  $N$  – густота насаждения, шт/га;

$l_n$  – расстояние подтрелевки, м;

$k_{изр}$  – доля вырубаемого компонента леса.

Реализация представленных выражений для комплексной оценки эффективности выполнения первичной транспортировки древесины потребовала проведения экспериментальных исследований.

### Сбор данных

Для прогнозирования затрат на трелевку древесины при использовании машины Mounty 4000+ WoodyH60 был проведен производственный эксперимент с целью получения информации по составляющим ее цикла работы. Наблюдения проводились в период с марта 2022 г. по май 2023 г. в Смолянском лесничестве, которое расположено в Смолянской области южно-центральной части Болгарии, где преобладают хвойные насаждения: ель, белая сосна и пихта. Лесная площадь лесничества составляет 17271,8 га. Общий запас составляет 4 467 805 м<sup>3</sup>. Ежегодный средний объем лесопользования составляет 355 17 м<sup>3</sup>. На рис. 3 видно, что основной резерв для лесозаготовок (333 860 м<sup>3</sup>) расположен на крутых склонах местности (20...30 градусов), где горные процессоры наиболее востребованы.

Рабочая бригада состояла из трех человек – один оператор, один чоковерщик, один рабочий с бензопилой для валки деревьев, обрезки их вершин и стволов от сучьев. Для оператора канатная дорога имела приоритет. По прибытии новой партии хлыстов он прерывал работу процессорной головки на верхнем складе и занимался разгрузкой. После того как разгрузка была завершена, каретка сразу же отправлялась обратно к месту формирования новой пачки лесоматериалов. Скорость движения каретки вверх в холостом состоянии была до 5 м/с, а вниз в загруженном состоянии составляла от 2 до 4 м/с в зависимости от массы груза.

Замеры продолжительности рабочих операций проводились хронометражным методом с точностью до 1 секунды. Длины и диаметры трелеваемых хлыстов измерялись рулеткой с точностью до 1 см. Было зафиксировано 1250 циклов транспортировки древесины с погрешностью измерения времени менее 3 %. Исследование проводилось при заготовке и транспортировке древесины с 33 трасс канатной установки при суточной производительности от 20,9 до 58,0 м<sup>3</sup>. Средняя рейсовая нагрузка при выполнении выборочных рубок составляла 0,9 м<sup>3</sup>. Среднее расстояние трелевки составило 181 м (рис. 4).

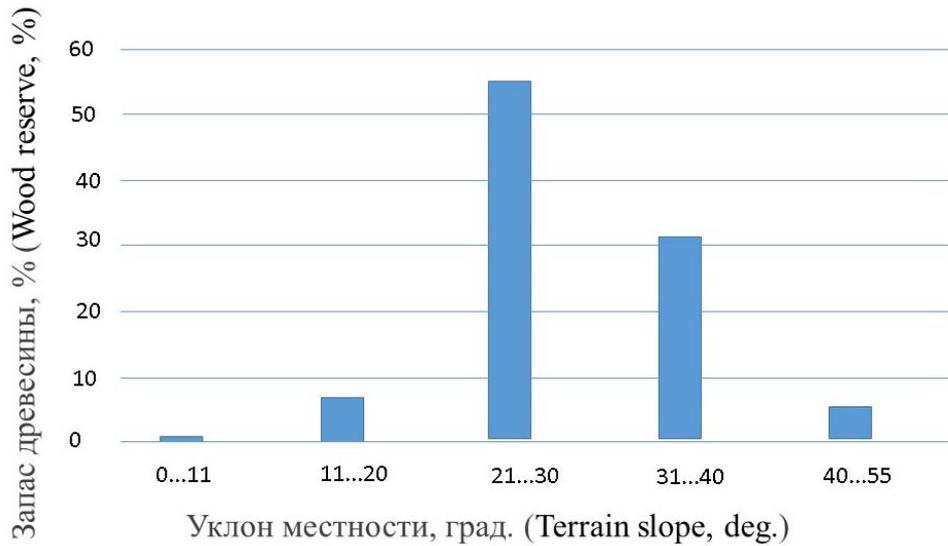


Рисунок 3. Распределение запаса леса в зависимости от уклона местности в Смолянском лесничестве Республики Болгария

Figure 3. Distribution of forest stock depending on the slope of the terrain in the Smolyansky forestry of the Republic of Bulgaria

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

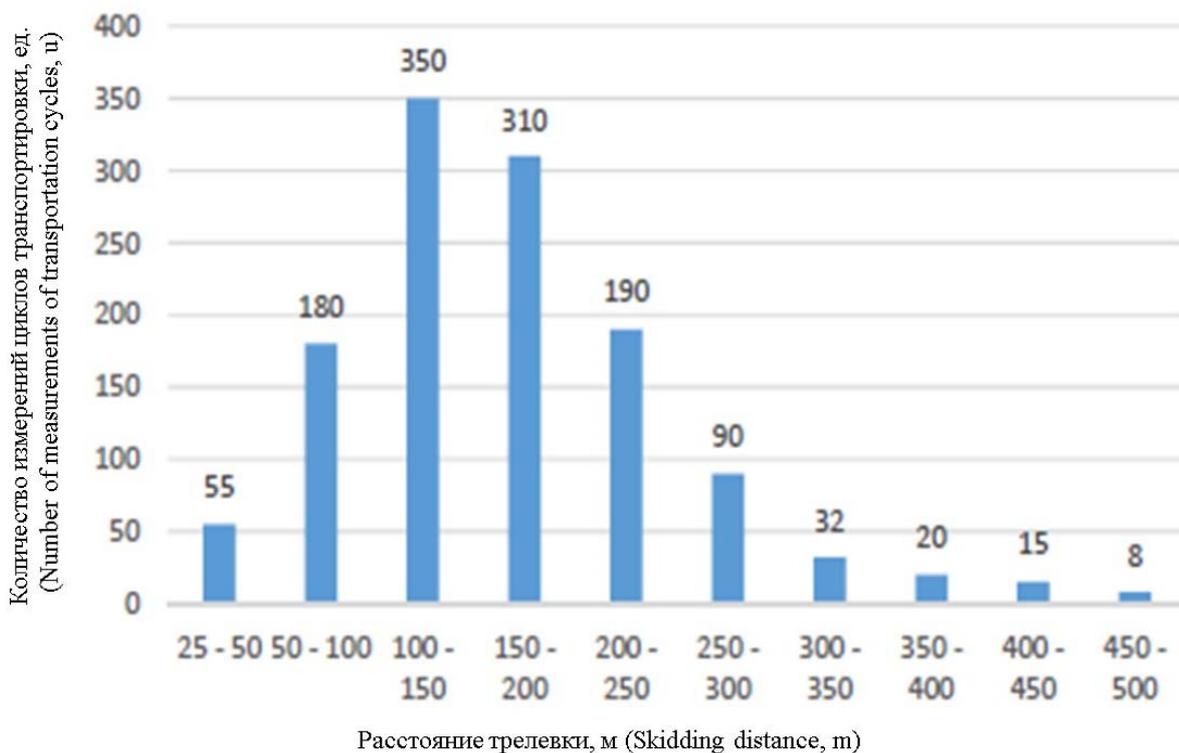


Рисунок 4. Количество измерений циклов транспортировки древесины при различных расстояниях трелевки  
Figure 4. Number of measurements of wood transportation cycles at different skidding distances

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Для прогнозирования повреждаемости деревьев  $C_2$  при использовании машины Mouny 4000 + WoodyH60 на первичной транспортировке древесины был проведен имитационный эксперимент (среда Solidworks), где на двух уровнях варьировались три основных фактора. Это расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната –  $l_n$ ; густота насаждения –  $N$  и доля вырубемого компонента леса –  $k_{изр}$ . Таким образом, было проведено 8 опытов с дублированием каждого из них 15 раз. (табл. 2).

### *Анализ данных*

Обработка результатов производственного и имитационного эксперимента осуществлялась в среде MS Excel.

Для получения статистических характеристик составляющих элементов времени цикла первичной транспортировки древесины, были проведены предварительно 100 замеров по продолжительности зацепки хлыстов –  $T_5$ , и далее на основе полученных данных определялось минимальное число измерений для репрезентативной выборки. Для этого рассчитывался коэффициент вариации, задавался показатель точности ошибки наблюдений между генеральной и выборочной средними. В нашем случае была задана вероятностью возникновения ошибки – 95% (уровень значимости  $p=0,05$ ). Минимально необходимое количество наблюдений для получения репрезентативной выборки составило – 43. После этого сбор статистической информации по всем составляющим цикла первичной транспортировки древесины осуществлялся следующим образом: упорядочивание значений ряда наблюдений по возрастанию; проверка результатов наблюдений на аномальность; расчет параметров статистических оценок; выбор закона распределения, выравнивание ряда по выбранному закону и

проверка согласия эмпирического и теоретического распределений по критерию Пирсона.

Для получения зависимости повреждаемости деревьев от густоты насаждения ( $N$ ), расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната ( $l_n$ ), интенсивности рубки ( $k_{изр}$ ) был проведен имитационный эксперимент в среде Solid works. Последовательность эксперимента была следующей. Сначала с помощью абриса создавалась конфигурация лесосеки. Затем в соответствии с таксационным описанием насаждения на ее поверхности размещались деревья со своими индивидуальными характеристиками. Далее в соответствии с программой рубки от пня отделялись стволы деревьев, предназначенные для валки и укладывались на землю с учетом положения оставляемых на лесосеке для последующего лесовыращивания. После этого строилась траектория подтрелевки хлыстов к трассе канатной установки; по полученной траектории определялось количество контактов между деревьями и хлыстами, которые вытягивались с полупасек к трассе канатной установки. В ходе обработки данных имитационного эксперимента подтвердилась гипотеза о нормальности распределения выходной величины  $C_2$  по критерию Пирсона –  $\chi^2$ ; а также гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена –  $G$ . После этого были определены значимые коэффициенты регрессии с помощью критерия Стьюдента –  $t$  и получено с подтверждением достоверности по критерию Фишера –  $F$  следующее уравнение:

$$C_2 = -0,085153 - 0,000294 N + 0,1414816 l_n + 4,6392857 k_{изр} - 0,000331 N l_n + 0,0167399 N k_{изр} - 0,673806 l_n k_{изр} + 0,009938 N l_n k_{изр}. \quad (3)$$

Характеристики изменяемых факторов

Table 2

Characteristics of the measured factors

Фактор   Factor		Уровни фактора   Factor levels			Интервал варьирования   Interval variations	
Наименование   Name	Обозначение   Designation	верхний   top	основной   main	нижний   lower		
	натуральное   natural				нормализованное   normalized	
Густота насаждения, шт./га   Planting density, pcs./ha	$N$	$x_1$	1681	901	121	780
Расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната, м.   Distance of pulling timber under the line of the supporting rope, m	$l_n$	$x_2$	38	20	2	18
Интенсивность рубки   Felling intensity	$k_{цеп}$	$x_3$	0,8	0,5	0,2	0,3

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

### Результаты

Результаты хронометражных наблюдений для сбора данных по составляющим времени цикла работы машины Mounty 4000 + WoodyH60 представлены в табл. 3-6.

По результатам проведенных наблюдений общее среднее рабочее время в течении дня составило – 9 часов и 25 минут (565 минут). Среднее количество циклов – 43 в день. Продолжительность среднего цикла – 7 минут 22 секунды  $\pm$  21 секунда, с вероятностью возникновения ошибки 95% ( $p=0,05$ ). Максимальная производительность - 58 м<sup>3</sup>/см.

Анализ структуры рабочего времени (табл. 3) показывает, что доля времени на выполнение непосредственно первичной транспортировки (5 часов 10,5 минуты) составляет 57,5 % от общей продолжительность работы.

Время подготовки и время завершения работ является регулярным и включает в себя: техническую подготовку инструмента и оборудования; натяжение поддерживающего каната; обследование канатной дороги; выход бригады к рабочему месту.

Заключительные работы включают в себя: ослабление поддерживающего троса и опускание каретки на землю; возвращение бригады с рабочего места к машине на погрузочный пункт; сбор инструментов, бензопил и личного инвентаря.

Среди перерывов наибольшая доля приходится на техническое обслуживание (смена режущих цепей, заточка цепей, проверка и заправка бензопил).

Нерабочее время на первичной транспортировке древесины включает в себя обеденный перерыв, отдых, перерывы по личным причинам. Кроме этого, оно может быть связано с необходимостью погрузки и сортировки лесоматериалов на верхнем складе, а также проверки контролирующих органов. В этом случае оператор прерывает процесс первичной транспортировки, перебирает сортаменты рядом с грузовым автомобилем, записывает их диаметр по торцу. После этого осуществляется погрузка древесины на лесовозный транспорт в присутствии представителя лесного хозяйства, который заполняет необходимые документы учета. В это время рабочие на вырубке не заняты.

Общая структура рабочего времени в течении дня

Table 3

General structure of working time during the day

Рабочие операции   Work operations	Продолжительность 43 циклов работы, мин   Duration 43 operating cycles, min	Продолжительность 43 циклов работы, %   Duration of 43 operating cycles, %
Чистое время работы в течении дня   Total net work time during the day		
Составляющие элементы циклового времени - $T_1$ , $T_3$ , $T_7$ , $T_9$ , $T_{10}$ и $T_{11}$   The constituent elements of cycle time are $T_1$ , $T_3$ , $T_7$ , $T_9$ , $T_{10}$ and $T_{11}$	40,3	7,13
Время на формирование трелюемой пачки- $T_4$ , $T_5$ и $T_6$   Time to form a treaded pack - $T_4$ , $T_5$ and $T_6$	174,9	30,97
Время на движение каретки по несущему канату в холостом и рабочем состоянии - $T_2$ и $T_8$   Time for the carriage to move along the supporting rope in idle and working condition - $T_2$ and $T_8$	95,3	16,87
Общее чистое время работы в течении дня   Total net work time during the day	310,5	54,97
Вспомогательное время   Auxiliary time		
Подготовительно-заключительные работы   Preparatory and final work	45	7,97
Организационные перерывы   Organizational breaks	5	0,89
Время на перемещения работников внутри лесосеки   Time to move workers inside the cutting area	8,5	1,5
Обслуживание техники (устранение неисправностей, техническое обслуживание и заправка горюче-смазочными материалами)   Equipment maintenance (troubleshooting, maintenance and refilling with fuels and lubricants)	11	1,95
Общее вспомогательное время   Total auxiliary time	69,5	12,3
Нерабочее время   Non-working hours		
Нарушения рабочего процесса первичной транспортировки из-за погрузки, сортировки и проверки контролирующих органов   Primary transportation workflow disruptions due to loading, sorting and regulatory inspections	20	3,54
Обеденный перерыв   Lunch break	30	5,31
Перерывы на отдых между циклами   Rest breaks between cycles	12	2,12
Перерывы по личным причинам   Breaks for personal reasons	8	1,42
Общее нерабочее время   Total non-working time	70	12,39
Время вне рабочего места   Time away from the workplace		
Доставка рабочих на лесосеку и обратно   Delivery of workers to the cutting site and back	115	20,34
Общее время вне рабочего места   Total time away from work	115	20,34

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 4

Результаты измерений составляющих цикла работы машины Mouny 4000+ WoodyH60

Table 4

Measurement results of components of the cycle of operation of the machine Mouny 4000+ Woody H60

Составляющие времени цикла   Components of cycle time	Среднее значение, с   Average value, sec	Стандартное от- клонение, с   Standard deviation, sec	Минимальное зна- чение, с   Minimum value, sec	Максимальное зна- чение, с   Maximum value, sec
$T_1$	5.0	-	4	6
$T_3$	11.9	6.6	5	41
$T_4$	65.4	14.8	3	121
$T_5$	134.1	43.8	18	220
$T_6$	49.0	9.4	0	79
$T_7$	12.7	4.7	8	35
$T_9$	7.1	6.5	2	30
$T_{10}$	6.5	3.8	2	20
$T_{11}$	8.6	4.3	5	65
$\Sigma$	303.4			

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Результаты измерений составляющей цикла работы  $T_2$  в зависимости от среднего расстояния трелевки

Table 5

Measurement results of the component of the work cycle  $T_2$  depending on the average skidding distance

Расстояние/время Distance/time	600 м   600 m	500 м   500 m	400 м   500 m	300 м   300 m	200 м   200 m	100 м   100 m
Среднее значение, с   Average value, sec	201.3	149.6	94.5	62.9	50.1	31
Минимальное значение, с   Minimum value, sec	185	122	95	61	45	25
Максимальное значение, с   Maximum value, sec	232	192	120	92	57	48
Стандартное отклонение, с   Standard deviation, sec	10.4	16.1	6.5	17.9	14.3	8.0

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Результаты измерений составляющей цикла работы  $T_8$  в зависимости от среднего расстояния трелевки

Table 6

Measurement results of the component of the  $T_8$  operation cycle depending on the average skidding distance

Расстояние/время	600 м   600 m	500 м   500 m	400 м   500 m	300 м   300 m	200 м   200 m	100 м   100 m
Расстояние/время Distance/time	225.5	180.2	180.2	135.3	89.9	40.0
Среднее значение, с   Average value, sec	205	161	161	128	81	42
Минимальное значение, с   Minimum value, sec	264	206	206	166	113	63
Максимальное значение, с   Maximum value, sec	11.4	18.1	18.1	16.5	7.9	8.2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Полученное в ходе обработки данных имитационного эксперимента (табл. 7) регрессионное уравнение позволяет изучить характер воздействия техники на оставляемый древостой в зависимости от расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната, интенсивности рубки, густоты насаждения, объема хлыста и запаса древесины (рис. 4). При этом, через густоту насаждения можно изучить влияние на повреждаемость деревьев – запаса древесины  $q_{за}$  и объема хлыста  $V_{хл}$ , а также через расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната можно изучить влияния на повреждаемость – ширины трассы канатной установки  $b_с$  и ширины пасаки  $\Delta$ , угла укладки дерева  $\beta$  относительно трассы канатной установки и длины лесоматериала  $l_{н.м.}$ .

Анализ графика показал (рис. 5, а) что повреждаемость стволов оставляемых деревьев на первичной транспортировке древесины растет при увеличении запаса леса и увеличении интенсивности рубки. Из графика (рис. 5, б) видно, что уменьшение объема хлыста и увеличение запаса древесины на

1 га приводит к повышению повреждаемости деревьев на лесосеке. Динамика роста повреждаемости деревьев тем больше, чем больше становится интенсивность рубки вместе с объемом хлыста (рис. 5, в) и вместе с густотой насаждения (рис. 5, г).

На рис. 6 показана значимость основных факторов влияния на исследуемые показатели эффективности первичной транспортировки (общие производственные затраты –  $C_1$ ; повреждаемость деревьев, оставляемых на лесосеке –  $C_2$ ). Анализ гистограммы общих затрат на процесс первичной транспортировки древесины в качестве наиболее значимых факторов показал: интенсивность рубки –  $\beta/\alpha= 0,67$ ; ширину пасаки –  $\beta/\alpha= 0,74$ ; запас леса –  $\beta/\alpha= 0,84$ ; глубину лесосеки –  $\beta/\alpha = 1,0$ ; а также длину трассы канатной установки –  $\beta/\alpha= 1,1$ . Анализ гистограммы повреждаемости стволовой части деревьев оставляемых на лесосеке выявил следующие наиболее значимые природно-производственные факторы: ширина трассы канатной установки –  $\beta/\alpha= 0,58$ ; интенсивность рубки –  $\beta/\alpha= 0,95$ ; запас леса –  $\beta/\alpha= 1,0$ ; ширина пасаки –  $\beta/\alpha= 1,52$ .

Условия, результаты и анализ эксперимента

Table 7

Conditions, results and analysis of the experiment

Значения факторов и результаты эксперимента   Factor values and experiment results	№ опыта   № Experience							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$l_n, м   l_n, m$	2	2	18	18	2	2	18	18
$k_{изр}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8
$N, шт./га   N, pc./him$	121	1681	121	1681	121	1681	121	1681
$C_{21}$	0,2	7,51	5,2	103,6	2,1	44,7	15,2	487,9
$C_{22}$	1,2	10,6	7,9	107,9	4,9	48,1	22,7	494,7
$C_{23}$	0,8	9,4	7,6	107,5	4,7	46,9	21,3	493,1
$C_{24}$	0,7	9,3	6,5	106,5	3,5	45,4	18,8	490,5
$C_{25}$	1,6	11,3	9	111,3	6,1	50,1	24,8	496,9
$C_{26}$	1,5	11,1	8,2	110,2	5,7	49,5	24,3	496,3
$C_{27}$	1,3	10,9	8,1	110,2	5,1	48,9	23,9	495,4
$C_{28}$	1,9	11,9	9,6	114,1	6,9	52,1	25,9	499,5
$C_{29}$	1,8	11,7	9,3	112,1	6,6	51,9	25,8	497,3
$C_{210}$	1,7	11,4	9,1	111,8	6,5	50,2	25	497,1
$C_{211}$	2,1	12,2	10,5	115,4	7,6	52,3	27,6	500,7
$C_{212}$	1,9	12,1	10,2	114,8	7,3	52,2	26,3	500,1
$C_{213}$	2,3	13,7	10,7	116,1	7,8	53,8	28,7	501,2
$C_{214}$	2,8	15,4	12,6	123,5	10,4	56,5	36	505,1
$C_{215}$	2,6	14,9	11,8	116,2	8,7	54,4	30,8	503,4
$\bar{y}_j$	1,62666667	11,56066667	9,08666667	112,08	6,26	50,46666667	25,14	497,28
$\sigma^2$	0,504952381	4,225349524	3,788380952	23,95028571	4,272571429	11,0652381	23,79542857	21,52171429
$\sigma$	0,710600015	2,0555655	1,946376365	4,893902912	2,067019939	3,326445264	4,878055819	4,639150168
$\hat{y}_i$	1,6266667	11,560667	9,086667	112,08	6,26	50,466667	25,14	497,28
$v$	0,436844271	0,177806831	0,214201361	0,043664373	0,330194878	0,065913711	0,194035633	0,00932905

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

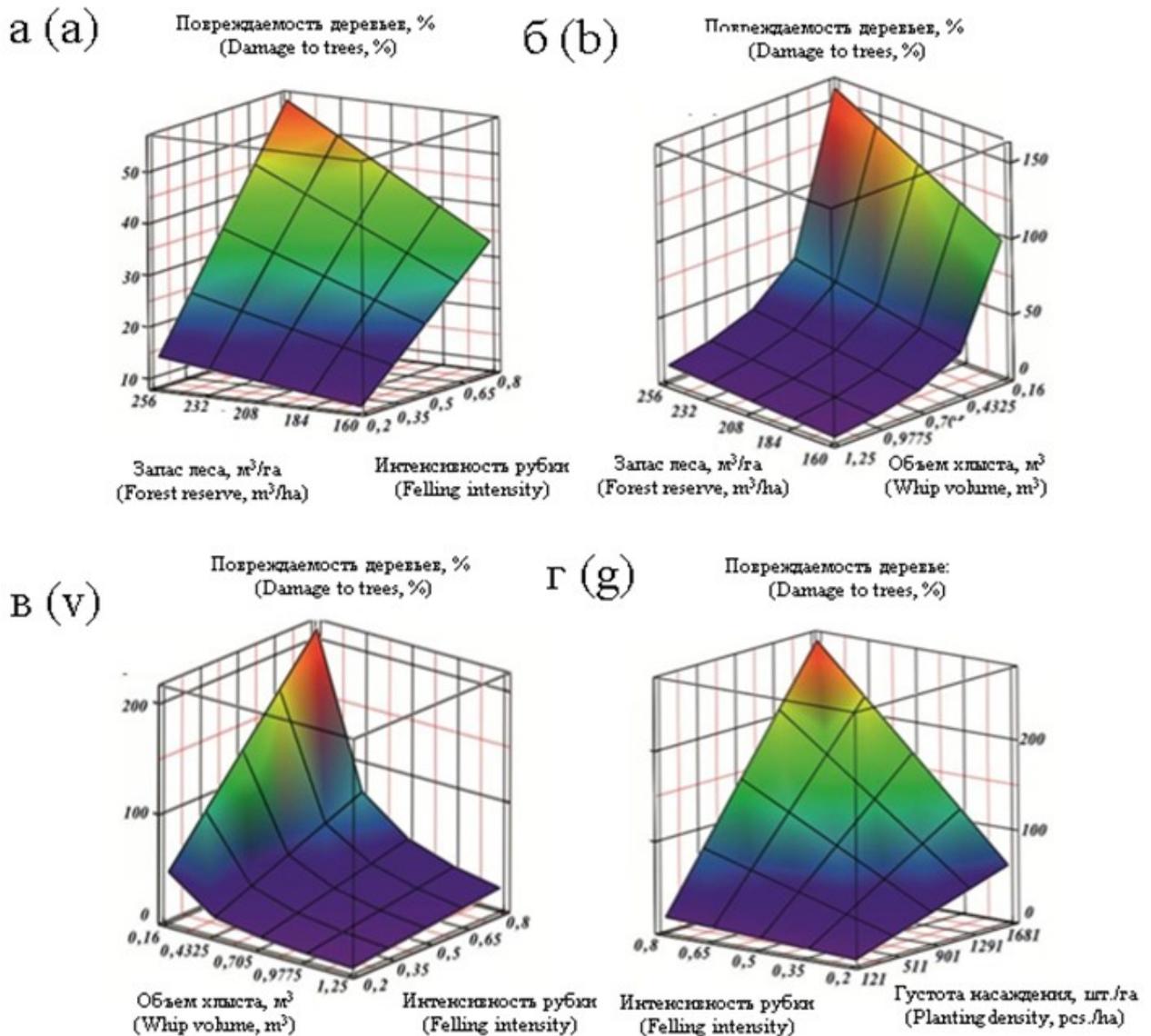


Рисунок 5. Графики зависимости повреждаемости оставляемых на лесосеке деревьев от объема хлыста, запаса древесины, расстояния подрежки и интенсивности рубки

Figure 5. Graphs of the dependence of the damage of trees left in the cutting area on the main factors of influence

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ воздействия основных факторов влияния на показатели эффективности  $C_1$  и  $C_2$  позволили выявить наиболее подходящие для управления процессом первичной транспортировки древесины с целью его совершенствования. В результате были отобраны следующие лесоводственные и технологические параметры: ширина пазухи -  $\Delta$ ; интенсивность изреживания насаждения -  $k_{изр}$ ; угол укладки предмета труда относительно волока -  $\beta$ . Они варьировались с помощью полученного математического

аппарата на пяти уровнях. Результаты моделирования показали рост повреждаемости деревьев при увеличении ширины пазухи, интенсивности рубки и уменьшении угла укладки дерева относительно трелевочного волока. При этом были определены благоприятные области их значений при уровне повреждаемости  $C_2$  ниже требуемых нормативов - 12%. Они представлены в табличной форме на рис. 7.

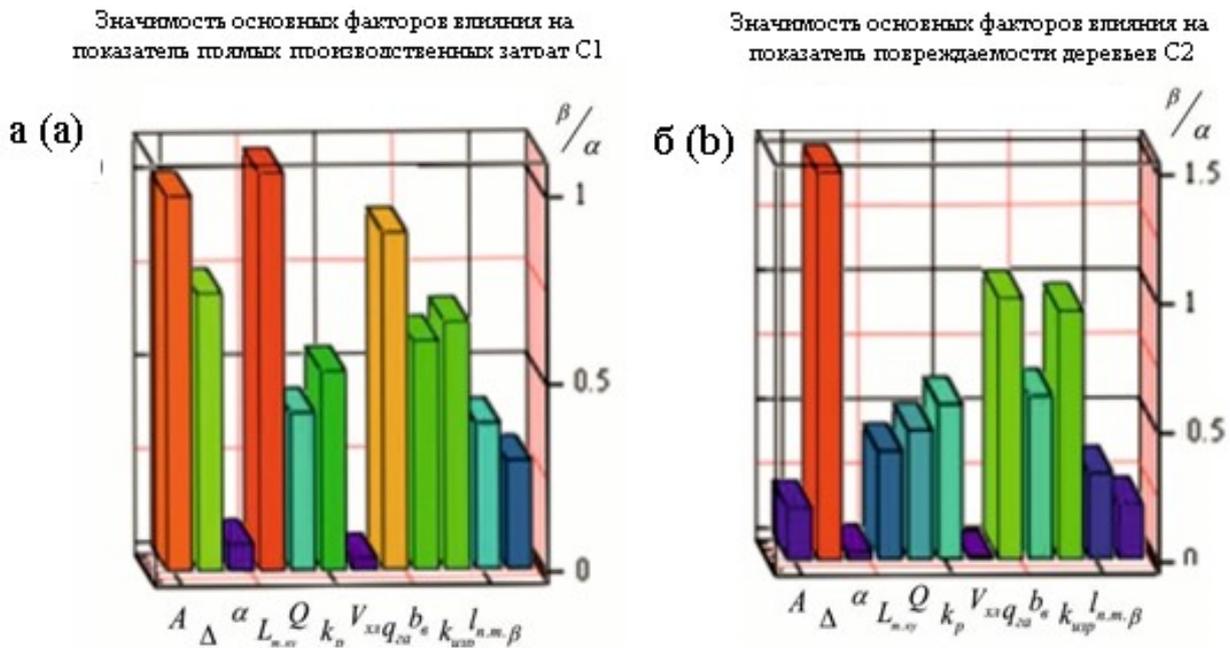


Рисунок 6. Определение значимости основных факторов влияния на показатели  $C_1$  и  $C_2$

Figure 6. Determining the significance of the main factors influencing indicators  $C_1$  and  $C_2$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

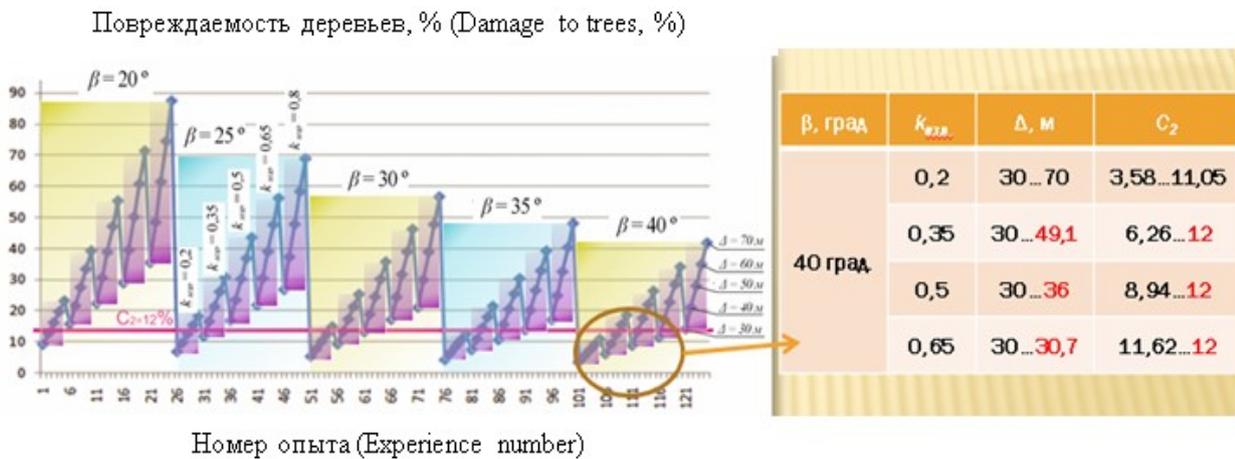


Рисунок 7. Результаты расчета повреждаемости деревьев при работе Mouny 4000+ Woody H60

Figure 7. Results of calculating the damage to trees during operation of the Mouny 4000+ Woody H60

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

### Обсуждение

Вопросами исследования показателей выполнения первичной транспортировки древесины занимались многие российские и зарубежные ученые.

Анализ этих работ показывает, что эффективность выполнения рубок на горных склонах, во многом зависит от результата выполнения первичного транспорта леса. Данная операция является наиболее затратной на лесосеке и в наибольшей степени определяет экологический ущерб окружающей среде. При этом, в настоящее время, по мнению Каляшова В.А. и других ученых (2022) [10] выбор технологии первичной транспортировки древесины, техники для ее выполнения, схем и параметров работы происходит без достаточного обоснования.

По мнению Заикина А.Н. (2019, 2023) [8-9, 17] для принятия научно-обоснованных решений в этом вопросе требуется разработка комплексного критерия оценки эффективности, учитывающего экологические последствия и экономический результат выполнения операции. На его основе необходима разработка соответствующего математического аппарата и программного обеспечения. Для создания такого обобщенного критерия качества представляется целесообразным задействовать процедуры свертывания целей по методу Гермеймера.

Результаты проведенных исследований, представленные в статье, могут лечь в основу создания такого математического аппарата для достоверного прогноза эколого-экономических показателей первичной транспортировки древесины, а также дать возможность использовать комплексный критерий эффективности для многокритериальной оценки и возможно оптимизации процесса на примере функционирования машины Mounty 4000 в горных условиях лесосек. В дальнейших исследованиях необходимо создание моделей функционирования всех других перспективных альтернатив, включая канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических конструкций. По мнению В.С.Сюнева и Графовой (2022, 2023) [6, 18] в оценке

экологического ущерба наряду с повреждаемостью деревьев, оставляемых на лесосеке необходимо также учитывать повреждаемость почвы и подроста.

### Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведена структуризация цикла работы машины Mounty 4000 и на ее основе получена математическое выражение для расчета затрат на эксплуатацию при выполнении первичной транспортировки древесины. По всем составляющим времени цикла получены законы распределения и статистические характеристики их продолжительностей в ходе производственного эксперимента в условиях горной местности Болгарии. Гипотеза нормальности распределения была подтверждена критерием Пирсона при заданном уровне значимости  $p=0.05$ . Полученные результаты можно использовать при нормировании труда и при прогнозировании технико-экономической эффективности применения горных процессоров на лесозаготовках.

2. Проведен имитационный эксперимент для получения регрессионной зависимости повреждаемости деревьев, оставляемых на лесосеке от расстояния подтаскивания хлыстов под линию несущего каната ( $l_n=2...18$  м), интенсивности рубки ( $k_{изр} = 0,2...0,8$ ) и густоты насаждения ( $N = 121...1681$  шт./га). Полученное регрессионное выражение позволяет достоверно прогнозировать экологические последствия первичной транспортировки древесины с учетом применяемой технологии в условиях горных лесосек.

3. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований рекомендованы к использованию на стадии проектирования лесозаготовительного производства для комплексной оценки функционирования технических средств одновременно с экономических и экологических позиций. С этой целью А.С. Черных и др. (2023) [16] была разработана программа для ЭВМ «Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок» (свидетельство о государственной регистрации № 2023662656).

### Список литературы

1. Абузов А. В., Григорьев И. В., Абузов Я. А., Каляшов В. А., Григорьева О. И. Методика расчёта экономической эффективности использования аэростатических летательных аппаратов на лесотранспортных операциях. *Resources and Technology*. 2023; 20 (2): 55-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54301934>.
2. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Оценка эффективности эксплуатации лесотранспортных систем на базе аэростатно-канатных установок. *Системы. Методы. Технологии*. 2019; 4 (44): 107-111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41483214>.
3. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2022; 1(385): 110-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47964187>.
4. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2021; 4(382): 117-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46332902>.
5. Бухтояров Л. Д., Абрамов В. В., Просужих А. А., Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках. *Resources and Technology*. 2020; 17 (3): 1-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>.
6. Графова Е. О., Сюнёв В. С., Горбач В. В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-западного региона РФ. *Лесотехнический журнал*. 2023; 2 (50): 5-24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.
7. Григорьев И. В., Дмитриев А. С., Каляшов В. А., Должиков И. С., Кривошеев А. А., Швецов А. С., Григорьева О. И. Сравнительный анализ воздействия на почвогрунты лесных машин с различными двигателями на склонах. *Системы. Методы. Технологии*. 2024; 1 (61): 122-129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61559935>.
8. Заикин А. Н., Сиваков В. В., Шевелева Е. В. Методы снижения повреждаемости стволов деревьев при выборочных и санитарных рубках леса Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2019; 4:200-211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538966>.
9. Заикин А. Н., Сиваков В. В., Зеликов В. А., Стасюк В. В., Чуйков А. С., Зеликова Н. В. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости. *Лесотехнический журнал*. 2022; 1 (45): 96-109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525086>.
10. Каляшов В. А., До Туан А., Хитров Е. Г., Григорьева О. И., Гурьев А. Ю., Новгородов Д. В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек. *Resources and Technology*. 2022; 19(2): 1-47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49330872>.
11. Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Каляшов В. А., Нгуен Т. Н. Современные системы машин для освоения лесосек на склонах. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021; 1: 35-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44560047>.
12. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021; 6(384): 121-134. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312342>.
13. Рябухин П. Б. Лесозаготовки и экология лесной среды. *Системы. Методы. Технологии*. 2019; 3(43): 96-99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yirtjj>.
14. Рябухин П. Б. Экономико-математическое моделирование оценки эффективности деятельности предприятий лесопромышленного комплекса. *Системы. Методы. Технологии*. 2020; 4(48): 139-144. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uplhaw>.
15. Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2023; 2(392): 88-105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50793225>.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662656. Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок / А.С. Черных, А.И. Максименков, Л.Д. Бухтояров, Д.Н. Афоничев, В.В. Абрамов, Е.В. Поздняков, Полукаров Д.А. (РФ). – Правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (RU). – № 2023661918, заявлено 09.06.2023; зарегистрировано 09.06.2023. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hvxwsm>.
17. Сиваков В. В., Заикин А. Н., Новикова Т. П., Зеликов В. А., Стасюк В. В., Чуйков А. С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере "ponssse", "komatsu" и "john deere". Лесотехнический журнал. 2023; 3 (51): 200-218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56967063>.
18. Сюнев В. С., Графова Е. О. Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду. Resources and Technology. 2022; 19 (1): 48-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48334315>.
19. Троянов И. Н., Абрамов В. В., Бухтояров Л. Д., Афоничев Д. Н., Черных А. С., Максименков А. И. Исследование технологических вариантов выполнения обрабатываемых операций лесосечных работ бензопилами. Лесотехнический журнал. 2019; 3 (35): 114-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysitvg>.
20. Capocchi I., Neri F., Borghini T., Bernetti I. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. Forestry: An International Journal of Forest Research. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
21. Cavalli R. Steep terrain forest operations – challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. International Journal of Forest Engineering. 2019; 30(3): 175. DOI: 10.1080/14942119.2019.1603030.
22. Erber G. Timber extraction by cable yarding on flat and wet terrain: a survey of cable yarder manufacturer's experience. Silva Fennica. 2020;54(2):10211. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10211>.
23. Francisca B. Safety in steep slope logging operations. Journal of Agromedicine. 2019; 24(2): 138. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1581115>.
24. Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Popikov P. I., Chetverikova I. V., Abramov V. V., Polukarov D. A. Study of the operation of the Mouny 4000 machine in logging in mountainous conditions in Bulgaria. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021;875:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012037.
25. Herajarv H. Science as a decision-support tool in forest policies. Silva Fennica. 2021; 55(2): 10566. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10566> 2021.
26. Rätty J., Hauglin M., Astrup R., Breidenbach J. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. Canadian Journal of Forest Research. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.
27. Rukomoynikov K. P., Sergeeva T. V., Gilyazova T. A., Tsarev E. M., Anisimov P. N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. Forestry Bulletin. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
28. Shegelman I. R. The analysis of the research areas in Russian timber industry using the knowledge base on the scientific publications of Russian researchers. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020; 12: 175. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP2/SP20201043.
29. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // Inventions. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

## References

1. Abuzov A., Grigoriev I.V., Abuzov Ya.A., Kalyashov V.A., Grigorieva O.I. Metodika raschota ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya aerostaticeskikh letatel'nykh apparatov na lesotransportnykh operatsiyakh. [Methodology for calculating the economic efficiency of using aerostatic aircraft in timber transport operations.] Resources and Technology. 2023; 20 (2): 55-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54301934>
2. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Otsenka effektivnosti ekspluatatsii lesotransportnykh sistem na baze aerostatno-kanatnykh ustanovok. [Assessment of the efficiency of operation of forest transport systems based on balloon-rope installations]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. = Systems. Methods. Technologies. 2019;4(44):107-111. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41483214>
3. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerostaticheskiye apparaty dlya lesozagotovok v trudnodostupnykh regionakh. [Aerostatic devices for logging in hard-to-reach areas]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2022; 1(385):110-127. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47964187>
4. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Tekhnologii promezhutochnykh rubok na trudnodostupnykh territoriyakh. [Technologies for intermediate felling in hard-to-reach areas]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2021;4(382):117-130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46332902>
5. Bukhtoyarov L.D., Abramov V.V., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V. Analiz konstruktsiy i tekhnologiy raboty forvarderov na lesozagotovkakh. [Analysis of designs and operating technologies of forwarders in logging operations.] Resources and Technology. 2020; 17 (3): 1-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>
6. Grafova E.O., Syuney V.S., Gorbach V.V. Analiz faktorov negativnogo vozdeystviya lesozagotovitel'nogo proizvodstva na prirodnyuyu sredu Severo-zapadnogo regiona RF. [Analysis of factors of the negative impact of logging production on the natural environment of the North-Western region of the Russian Federation.] Lesotekhnicheskyy zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2023; 2 (50): 5-24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>
7. Grigoriev I.V., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Dolzhikov I.S., Krivosheev A.A., Shvetsov A.S., Grigorieva O.I. Sravnitel'nyy analiz vozdeystviya na pochvogrunty lesnykh mashin s razlichnymi dvizhitelyami na sklonakh. [Comparative analysis of the impact of forestry machines with various propulsion systems on slopes on soils.] Sistemy. Metody. Tekhnologii. = Systems. Methods. Technologies. 2019;4(44):107-111. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61559935>
8. Zaikin A. N., Sivakov V. V., Sheveleva E. V. Metody snizheniya povrezhdayemosti stvolov derev'yev pri vyborochnykh i sanitarnykh rubkakh lesa. [Methods for reducing damage to tree trunks during selective and sanitary logging]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2019; 4:200-211. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538966>
9. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S., Zelikova N.V. Programmnoye obespecheniye dlya upravleniya lesokhozyaystvennym i lesozagotovitel'nym protsessami: otsenka primenimosti. [Forestry and harvesting management software: assessing applicability.] Lesotekhnicheskyy zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2022; 1 (45): 96-109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525086>
10. Kalyashov V.A., Do Tuan A., Khitrov E.G., Grigorieva O.I., Guryev A.Yu., Novgorodov D.V. Covremennyye sistemy mashin i tekhnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyakh gornyykh leseok. [Modern machine systems and technologies for wood harvesting and reforestation in mountain logging areas]. Resources and Technology. 2022;19(2):1-47. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49330872>
11. Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Kalyashov V.A., Nguyen T.N. Covremennyye sistemy mashin dlya osvoyeniya leseok na sklonakh. [Modern machine systems for the development of logging sites on slopes]. Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya. = Repair. Recovery. Modernization. 2021;1:35-42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44560047>
12. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Modelirovaniye vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh. [Modeling the interaction of forestry machines with soil when

working on slopes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal.* = Russian forestry journal. 2021;6(384):121-134. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312342>

13. Ryabukhin P.B. Lesozagotovki i ekologiya lesnoy sredy. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* [Logging and ecology of the forest environment]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2019;3(43):96-99. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yirtjj>

14. Ryabukhin P.B. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye otsenki effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa. [Economic and mathematical modeling of assessing the efficiency of activities of forestry enterprises]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2020;4(48):139-144. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uplhaw>

15. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Obosnovaniye tekhnologicheskikh protsessov i sistem mashin dlya lesosechnykh rabot [Justification of technological processes and machine systems for logging operations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal.* = Russian forestry journal. 2023;2(392):88-105. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50793225>

16. Chernykh A. S., Maksimenkov A.I., Bukhtoyarov L. D. [et al.]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF [Certificate of state registration of computer program RU]. Programma obosnovaniya tekhnologiy i sistem mashin dlya lesozagotovok [Program for substantiation of technology and systems of machines for logging]. No. 2023661918, 2023. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hvxwsm>

17. Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Tsifrovizatsiya sistemy organizatsii rabochikh protsessov lesozagotovitel'nykh mashin: otsenka effektivnosti na primere "ponssse", "komatsu" i "john deere". [Digitalization of the system for organizing work processes of forestry machines: efficiency assessment using the example of "ponssse", "komatsu" and "john deere".] *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry Engineering Journal. 2023; 3 (51): 200-218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56967063>

18. Syuney V.S., Grafova E.O. Novyye tekhnicheskkiye resheniya po snizheniyu negativnogo vozdeystviya lesopromyshlennykh proizvodstv na lesnyuyu sredu. [New technical solutions to reduce the negative impact of timber industry on the forest environment.] *Resources and Technology.* 2022; 19 (1): 48-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48334315>

19. Troyanov I.N., Abramov V.V., Bukhtoyarov L.D., Afonichev D.N., Chernykh A.S., Maksimenkov A.I. Issledovaniye tekhnologicheskikh variantov vypolneniya obrabatyvayushchikh operatsiy lesosechnykh rabot benzopilami. [Study of technological options for performing processing operations in logging operations using chainsaws.] *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry Engineering Journal. 2019; 3 (35): 114-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysitvg>

20. Capecchi I., Neri F., Borghini T., Bernetti I. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research.* DOI: 10.1093/forestry/cpad007.

21. Cavalli R. Steep terrain forest operations – challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. *International Journal of Forest Engineering.* 2019; 30(3): 175. DOI: 10.1080/14942119.2019.1603030.

22. Erber G. Timber extraction by cable yarding on flat and wet terrain: a survey of cable yarder manufacturer's experience. *Silva Fennica.* 2020;54(2):10211. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10211>.

23. Francisca B. Safety in steep slope logging operations. *Journal of Agromedicine.* 2019; 24(2): 138. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1581115>.

24. Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Popikov P. I., Chetverikova I. V., Abramov V. V., Polukarov D. A. Study of the operation of the Mounty 4000 machine in logging in mountainous conditions in Bulgaria. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2021;875:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012037.

25. Herajarv H. Science as a decision-support tool in forest policies. *Silva Fennica.* 2021; 55(2): 10566. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10566> 2021.

26. Rätý J., Hauglin M., Astrup R. Breidenbach J. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. Canadian Journal of Forest Research. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.

27. Rukomoynikov K. P., Sergeeva T. V., Gilyazova T. A., Tsarev E. M., Anisimov P. N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. Forestry Bulletin. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.

28. Shegelman I. R. The analysis of the research areas in Russian timber industry using the knowledge base on the scientific publications of Russian researchers. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020; 12: 175. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP2/SP20201043.

29. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // Inventions. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

### Сведения об авторах

*Глушков Сотир Петров* – доктор технических наук, профессор, Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132, ул. Кл. Охридски, София, 1756, Болгария, <http://orcid.org/0000-0002-9089-417X>, e-mail: [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg).

*Бояджиев Димитр Иванов* – доктор технических наук, профессор, Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132, ул. Кл. Охридски, София, 1756, Болгария, <http://orcid.org/0000-0001-5716-0169>, e-mail: [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com).

*Черных Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1601-420X>, e-mail: [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru).

*Попиков Пётр Иванович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Афоничев Дмитрий Николаевич* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра электротехники и автоматики, ул. Мичурина, 1, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9066-6428>, e-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

✉ *Абрамов Виталий Викторович* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8779-076X>, e-mail: [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru).

*Полукаров Денис Анатольевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-4928>, e-mail: [aviatorfut@mail.ru](mailto:aviatorfut@mail.ru).

*Савченко Станислав Игоревич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru).

### Information about the authors

*Sotir Petrov Glushkov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Forestry, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Cl. Ohridski street, Sofia, 1756, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0002-9089-41X>, e-mail: [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg).

*Dimitar Ivanov Boyadzhiev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Forestry, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Cl. Ohridski street, Sofia, 1756, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0001-5716-0169>, e-mail: [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com).

*Alexander S. Chernykh* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1601-420X>, e-mail: [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru).

*Petr I. Popikov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Dmitry N. Afonichev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great, Department of Electrical Engineering and Automatics, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9066-6428>, e-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

✉ *Vitaly V. Abramov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8779-076X>, e-mail: [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru).

*Denis A. Polukarov* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-4928>, e-mail: [aviatortut@mail.ru](mailto:aviatortut@mail.ru).

*Stanislav I. Savchenko* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author