



УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583

Статья

Экспериментальные исследования производительности форвардера с учётом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта

Бурмистрова Ольга Николаевна

доктор технических наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), olga.burm@mail.ru

Просужих Алексей Анатольевич

старший преподаватель, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), prosuzhikh75@mail.ru

Рудов Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), 89213093250@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inbox.ru

Получена: 25 декабря 2021 / Принята: 11 марта 2021 / Опубликовано: 21 марта 2021

Аннотация: Колёсные лесные машины доминируют в настоящее время в лесозаготовительном производстве в России и мире. По данным представителей ведущих мировых производителей лесных машин, поставляющих лесозаготовительную технику в Российскую Федерацию, доля машин для хлыстовой заготовки в России ежегодно снижается. На территории лесного фонда Российской Федерации преобладают почвогрунты III и IV категорий, которые в тёплый период года существенно теряют свою несущую способность из-за переувлажнения. Причём процессы очевидного потепления климата за последние годы привели к существенному уменьшению периода устойчивой зимней вывозки заготовленной

древесины, а значит, и времени эффективной трелёвки на таких почвогрунтах, когда они находятся в замёрзшем состоянии. Это отмечают лесозаготовители практически всех субъектов Северо-Западного федерального округа РФ. В ходе работы на переувлажнённых почвогрунтах в тёплый период года снижаются транспортные скорости, объёмы перевозимых пачек сортиментов, а следовательно, производительность форвардеров, повышается расход топлива и износ трансмиссии, т. е. увеличивается удельная себестоимость кубометра заготовленной древесины. Кроме этого, интенсивное колееобразование приводит к негативному экологическому воздействию леса, в результате чего замедляются лесовосстановительные процессы, проявляются признаки водной эрозии на трелёвочных волоках, угнетение корней, замедление роста, ослабление оставляемых на доращивание деревьев вблизи трасс движения. Безусловно, негативные экологические факторы работы форвардеров необходимо учитывать, но технико-экономические показатели их работы, в конечном итоге, всегда выходят на первый план в производственном процессе лесозаготовок. Экспериментальные исследования производительности форвардеров были проведены в производственных условиях, на лесосеках, расположенных на территории Прилузского и Сыктывдинского муниципальных районов Республики Коми летом 2019—2020 гг. Для опытов использованы колёсные форвардеры John Deere 1210G, 1510G. При проведении экспериментов проводилось зондирование почвогрунта на лесосеке. Составляющие затрат времени по отдельным операциям фиксировали путём хронометража.

Ключевые слова: лесные машины, лесозаготовки, трелёвка, форвардеры, лесные почвогрунты, экспериментальные исследования

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583

Article

Experimental studies of forward operation with regard to its performance indicators, cutting area parameters and soil physic-mechanical properties

Olga Burmistrova

*doctor of technical Sciences, Professor, Ukhta state technical University (Russian Federation),
olga.burm@mail.ru*

Aleksej Prosuzhik

senior teacher, Ukhta state technical University (Russian Federation), prosuzhikh75@mail.ru

Sergej Rudov

*candidate of technical Sciences, senior lecturer, Military Academy of communications named after
Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), 89213093250@mail.ru*

Ol'ga Kunickaya

*doctor of technical Sciences, Professor, Arctic state agrotechnological University
(Russian Federation), ola.ola07@mail.ru*

Igor Grigorev

*doctor of technical Sciences, Professor, Arctic state agrotechnological University
(Russian Federation), silver73@inboxl.ru*

Received: 25 December 2021 / Accepted: 11 March 2021 / Published: 21 March 2021

Abstract Wheeled forestry machines currently dominate the logging industry in Russia and in the world. According to representatives of the world's leading manufacturers of forest machines that supply logging equipment to the Russian Federation, the share of machines for tree-length harvesting in Russia is decreasing annually. On the territory of the Forest Fund of the Russian Federation soils of category III and IV predominate and in the warm period of the year they significantly lose their bearing capacity due to overwatering. Moreover, the processes of obvious climate warming in recent years have led to a significant reduction in the period of stable winter wood harvesting, and hence the period of effective skidding on such soils when they are in a frozen state has also decreased. This is noted by loggers of practically all subjects of the North-Western Federal district of the Russian Federation. As a result of working on waterlogged soils in the warm season, transport speeds, volumes of transported bundles of sorting materials, and, consequently, the productivity of forwarders decrease while fuel consumption and

transmission wear increase, thus the unit cost of a cubic meter of harvested wood increases. In addition, intensive rutting leads to a negative ecological impact on the forest, resulting in slowing down of reforestation processes. Negative effect is also manifested in signs of water erosion on skidding lugs, root suppression, growth slowdown, weakening of trees left for rearing near traffic routes. The negative environmental factors of forwarders' work must be taken into account, but the technical and economic indicators of their work, in the end, always come to the fore in the production process of logging. Experimental studies of forwarders' productivity were carried out in production conditions on cutting areas located on the territory of Priluzsky and Syktyvkar municipal districts of the Komi Republic in the summer of 2019-2020. For experiments, John Deere 1210g, 1510G wheel forwarders were used. During the experiments, the soil was probed in the cutting area. The components of time spent on individual operations were recorded by timing.

Keywords: forest machines, logging, skidding, forwarders, forest soils, experimental studies

1. Введение

Экспериментальные исследования были выполнены с целью:

1. Установить общий вид регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью зависимости:

- среднего объёма хлыста на делянке и среднего объёма сортимента;
- среднего объёма сортимента и числа сортиментов, загружаемых в кузов форвардера;
- затрат времени на загрузку кузова форвардера John Deere 1210G, связанных с работой манипулятора, и числа сортиментов;
- затрат времени на загрузку кузова форвардера, связанных с маневрированием машины, и запаса древесины на единицу площади.

2. Определить доверительные границы варьирования коэффициентов регрессионных зависимостей.

3. Изучить:

- затраты времени на разгрузку кузова форвардера, связанные с работой манипулятора;
- затраты времени, связанные с движением форвардера по отдельным участкам маршрута;
- увеличение времени цикла трелёвки в связи с простоями машины.

Эксперименты были проведены в производственных условиях, на лесосеках, расположенных на территории Прилузского и Сыктывдинского муниципальных районов Республики Коми летом 2019—2020 гг.

2. Материалы и методы

Для опытов были использованы колёсные форвардеры John Deere 1210G, 1510G.

При проведении экспериментов проводилось зондирование почвогрунта на лесосеке по методике [1], в результате установлено, что почвенно-грунтовые условия следует отнести ко II категории прочности (средней прочности).

Древостой на делянках смешанный, состав 3С3Е2Б2Ос, объём хлыста определяли и объём сортимента по методике [2], [3].

Составляющие затрат времени по отдельным операциям фиксировали путём хронометража, методика подробно описана в работах [3], [4].

Для обработки результатов экспериментов использована программа MS-Excel 2013, основу методики обработки экспериментальных данных составляют рекомендации [5—11].

Регрессионные модели получали в виде степенных и логарифмических функций, для обеспечения возможности определения доверительных границ варьирования коэффициентов моделей функции линеаризировали [7]. В итоге задача сводилась к оценке коэффициентов линейных полиномов общего вида:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_s X_s, \quad (1)$$

где a — коэффициент уравнения регрессии, X — экспериментальный фактор, s — число экспериментальных факторов.

Вектор коэффициентов регрессионной модели a :

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

находили как решение системы линейных уравнений метода наименьших квадратов при помощи матричного метода [5—11]:

$$a = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

где X — матрица значений экспериментальных факторов:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{2,1} & \dots & X_{s,1} \\ 1 & X_{1,2} & X_{2,2} & \dots & X_{s,2} \\ 1 & X_{1,3} & X_{2,3} & \dots & X_{s,3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1,n} & X_{2,n} & \dots & X_{s,n} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Y — вектор значений экспериментальной величины:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии и определения границ варьирования вычисляли элементы вспомогательной матрицы:

$$Z = (X^T X)^{-1}, \quad (6)$$

а также вектора отклонений экспериментальных и расчётных значений исследуемых величин:

$$e = \begin{bmatrix} Y_1 - Y_{1,расч} \\ Y_2 - Y_{2,расч} \\ Y_3 - Y_{3,расч} \\ \dots \\ Y_n - Y_{n,расч} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Далее определяли дисперсии оценок величин [5—11]:

$$S^2 = \frac{e^T e}{n - s}, \quad (8)$$

и стандартные ошибки определения коэффициентов уравнений регрессии:

$$S_{a_j} = \sqrt{S^2 Z_{l,l}}. \quad (9)$$

где l — номер коэффициента в уравнении регрессии.

Коэффициент уравнения регрессии следует признать значимым при выполнении условия [5—11]:

$$t_{a_l} = \frac{a_l}{S_{a_l}} \geq t. \quad (10)$$

Доверительные границы варьирования значений коэффициентов регрессионных моделей найдём по формуле [5—11]:

$$\delta_l = S_{a_l} t. \quad (11)$$

3. Результаты

Вначале определим зависимость среднего объёма сортимента V_a от среднего объёма хлыста V_x . В таблице 1 приведены характеристики выборок при сопоставлении среднего объёма хлыста на делянке и среднего объёма сортимента.

Таблица 1. Характеристики выборки среднего объёма хлыста на делянке и среднего объёма сортимента

Table 1. Characteristics of the sample of the average volume of the whip on the plot and the average volume of the assortment

Значение	$V_x, \text{м}^3$	$V_a, \text{м}^3$
min	0,11	0,10
max	1,32	0,37
S	0,248	0,055
Среднее	0,66	0,25

Результаты замеров сопоставлены на рисунке 1.

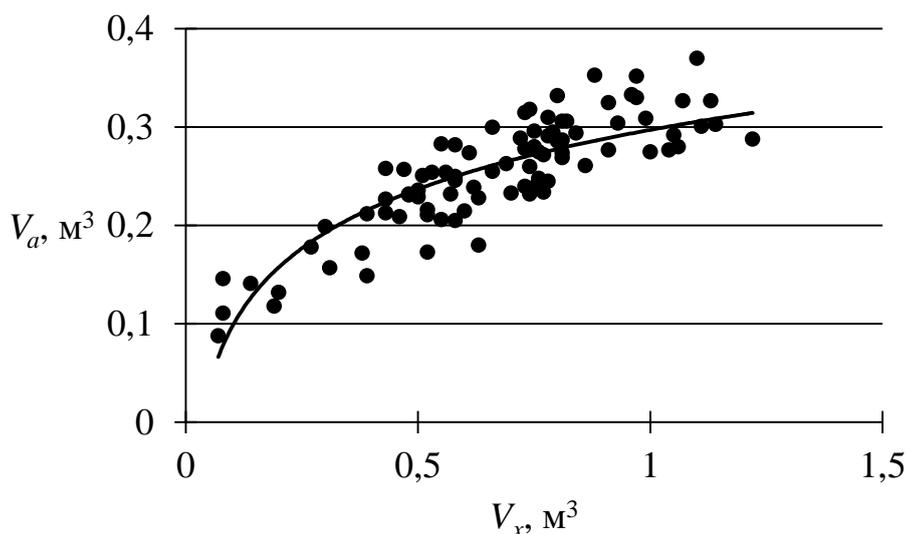


Рисунок 1. Зависимость среднего объёма сортимента от среднего объёма хлыста

Figure 1. Dependence of the average volume of the assortment on the tree length

В результате статистической обработки опытных данных установлено, что средний объём сортимента V_a (пиловочник) связан со средним объёмом хлыста V_x логарифмической зависимостью:

$$V_a = a_0 + a_1 \ln V_x, \quad (12)$$

$$V_a = 0,2976 + 0,1036 \ln V_x,$$

оценки коэффициентов модели (12) и их стандартные ошибки определения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Оценки коэффициентов и их стандартные ошибки (для функции среднего объёма сортимента от среднего объёма хлыста)

Table 2. Coefficient estimates and their standard errors (for the function of the average volume of the assortment from the average volume of the tree length)

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	t -критерий
a_0	0,297637	0,00396530	75,0606
a_1	0,103565	0,00576519	17,9638

В таблице 3 представлены основные характеристики выборок экспериментальных величин при исследовании составляющих затрат времени на загрузку и разгрузку кузова форвардера John Deere 1210G, в таблице 4 — форвардера John Deere 1510G.

Таблица 3. Основные характеристики выборок экспериментальных величин при исследовании составляющих затрат времени на загрузку и разгрузку кузова форвардера John Deere 1210G

Table 3. Main characteristics of samples of experimental values in the study of components of time spent on loading and unloading the body of the John Deere 1210G forwarder

Значение	$V_x, \text{ м}^3$	$V_a, \text{ м}^3$	$q, \text{ м}^3/\text{га}$	n	$t_{\text{загр},1}, \text{ МИН}$	$t_{\text{загр},2}, \text{ МИН}$	$t_{\text{разгр},1}, \text{ МИН}$	$t_{\text{разгр},2}, \text{ МИН}$
min	0,11	0,1	60	23	5,65	1,53	7,10	0,61
max	1,32	0,37	271	75	29,74	3,41	10,15	0,95
S	0,248	0,055	46,69	9,201	4,611	0,381	0,616	0,076
среднее	0,66	0,25	146,55	36,49	15,74	2,52	8,38	0,78

Таблица 4. Основные характеристики выборок экспериментальных величин при исследовании составляющих затрат времени на загрузку и разгрузку кузова форвардера John Deere 1510G

Table 4. Main characteristics of samples of experimental values in the study of components of time spent on loading and unloading the body of the John Deere 1510G forwarder

Значение	$V_x, \text{ м}^3$	$V_a, \text{ м}^3$	$q, \text{ м}^3/\text{га}$	n	$t_{\text{загр},1}, \text{ МИН}$	$t_{\text{загр},2}, \text{ МИН}$	$t_{\text{разгр},1}, \text{ МИН}$	$t_{\text{разгр},2}, \text{ МИН}$
min	0,07	0,09	13	30	11,93	2,76	7,62	0,57
max	1,22	0,37	235	103	46,38	8,02	10,23	0,97
S	0,257	0,057	46,05	12,636	6,0558	0,682	0,566	0,090
среднее	0,67	0,25	144,17	44,94	20,37	3,86	8,77	0,79

Сопоставим число сортиментов n , загруженных в кузов, с их средним объёмом V_a . Результаты для форвардера John Deere 1210G (объём загрузки до 15 м^3) представлены на рисунке 2, для форвардера John Deere 1510G (объём загрузки до 20 м^3) — на рисунке 3.

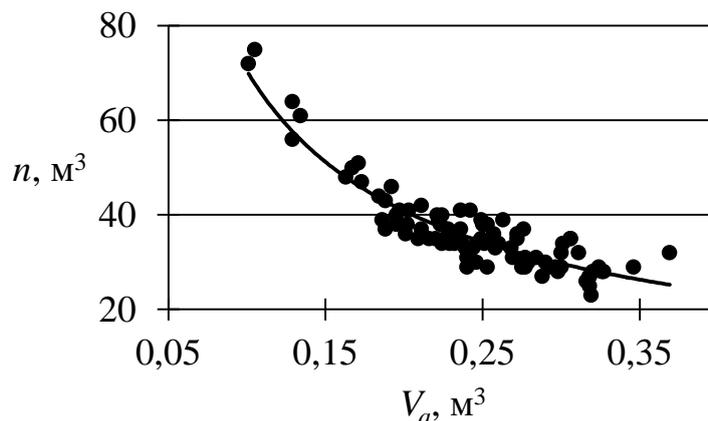


Рисунок 2. Зависимость числа сортиментов, загруженных в кузов, от их среднего объёма (форвардер John Deere 1210G)

Figure 2. Dependence of the number of assortments loaded into the body on their average volume (John Deere 1210G forwarder)

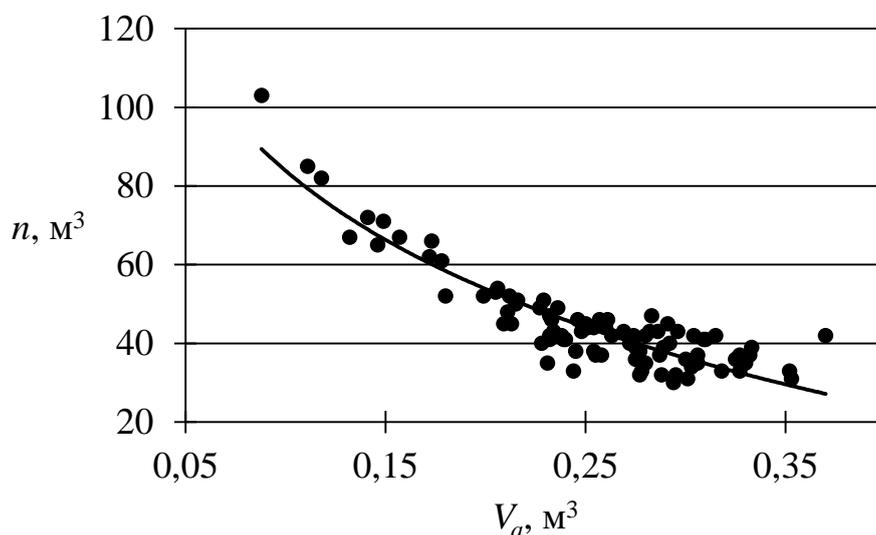


Рисунок 3. Зависимость числа сортиментов, загруженных в кузов, от их среднего объёма (форвардер John Deere 1510G)

Figure 3. Dependence of the number of assortments loaded into the body on their average volume (John Deere 1510G forwarder)

Обработка данных по числу сортиментов n , среднему их объёму V_a и объёму загрузки V показала, что величины достаточно точно можно связать уравнением ($R^2 = 0,897$):

$$n = a_0 + a_1 \frac{V}{V_a}, n = 8,593 + 0,428 \frac{V}{V_a}, \quad (13)$$

оценки коэффициентов уравнения и их стандартные ошибки определения представлены в таблице 5.

Таблица 5. Оценки коэффициентов уравнения числа сортиментов, загруженных в кузов, и их стандартные ошибки определения

Table 5. Estimates of the coefficients of the equation of the number of assortments loaded into the body, and their standard errors of determination

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий
a_0	8,59353	0,868358	9,89630
a_1	0,428484	0,0109415	39,1615

Результаты экспериментов по изучению затрат времени на загрузку кузова, связанных с работой манипулятора, для форвардера John Deere 1210G представлены на рисунке 4, для форвардера John Deere 1510G — на рисунке 5.

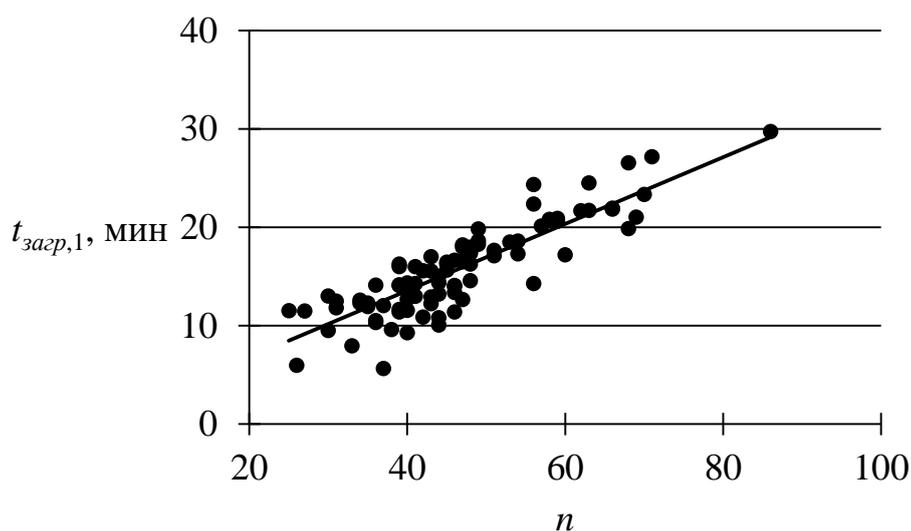


Рисунок 4. Затраты времени на загрузку кузова форвардера John Deere 1210G, связанные с работой манипулятора, в зависимости от числа сортиментов

Figure 4. Timing of loading the body of the John Deere 1210G forwarder with a manipulator, depending on the number of assortments

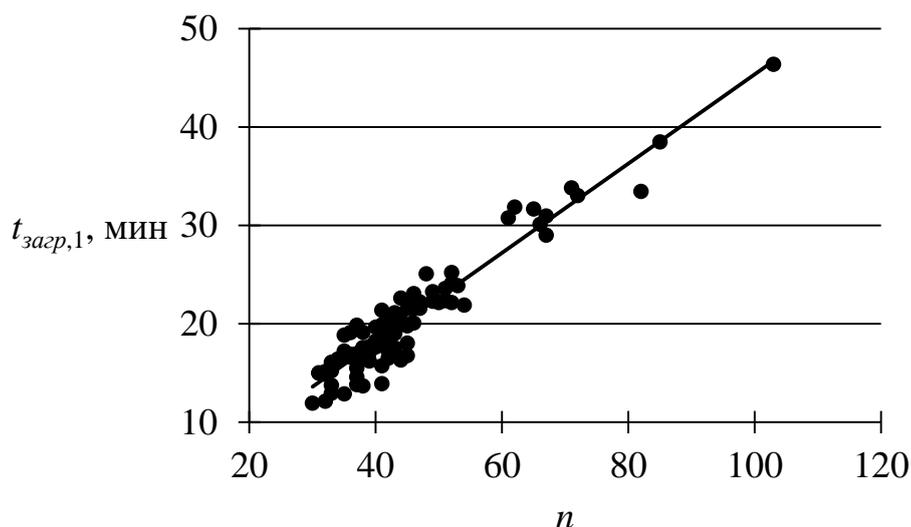


Рисунок 5. Затраты времени на загрузку кузова форвардера John Deere 1510G, связанные с работой манипулятора, в зависимости от числа сортиментов

Figure 5. Timing of loading the body of the John Deere 1510G forwarder with a manipulator, depending on the number of assortments

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, связывающее затраты времени, число сортиментов и объём загрузки кузова:

$$t_{загр,1} = a_0 V n, \tag{14}$$

$$t_{загр,1} = 0,0226 V n,$$

оценки коэффициентов уравнения и их стандартные ошибки определения представлены в таблице 6.

Таблица 6. Оценки коэффициентов уравнения затрат времени, связанных с работой манипулятора при загрузке кузова, и их стандартные ошибки определения

Table 6. Estimates of the coefficients of the equation of time costs associated with the operation of the manipulator when loading the body, and their standard errors of determination

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий
a_0	0,0226559	0,000182327	139,922

Результаты экспериментов по изучению затрат времени на загрузку кузова, связанных с маневрированием машины, для форвардера John Deere 1210G представлены на рисунке 6, для форвардера John Deere 1510G — на рисунке 7.

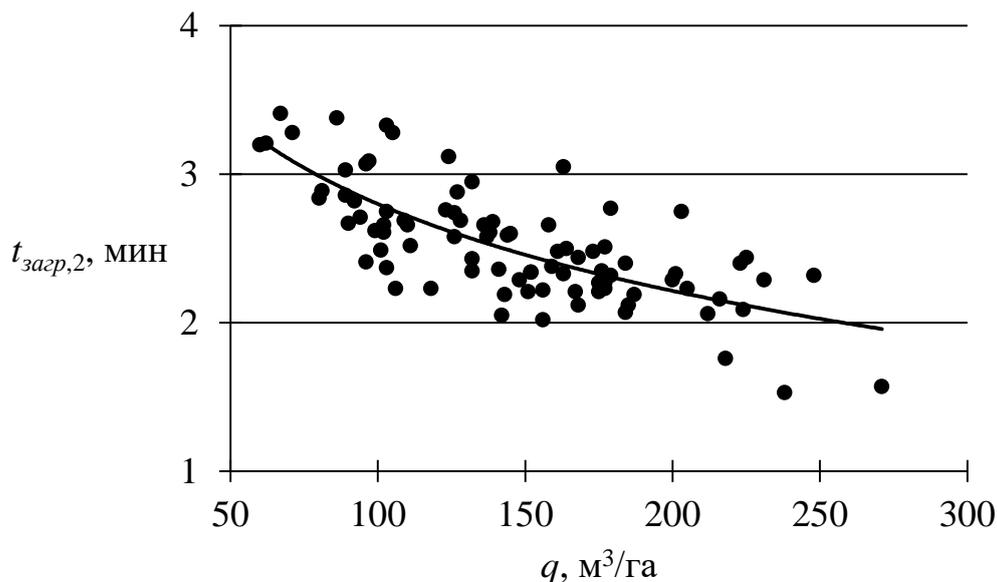


Рисунок 6. Затраты времени на загрузку кузова форвардера John Deere 1210G, связанные с маневрированием машины

Figure 6. Timing of loading the body of the John Deere 1210G forwarder due to machine maneuvering

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, связывающее затраты времени, объём загрузки кузова и запас древесины на гектар:

$$t_{загр,2} = a_0 V^{a_1} q^{a_2}, \quad (15)$$

$$t_{загр,2} = 0,2349V^{1,435} q^{-0,306},$$

оценки коэффициентов уравнения и их стандартные ошибки определения представлены в таблице 7.

Таблица 7. Оценки коэффициентов уравнения затрат времени, связанных с маневрированием форвардера при загрузке кузова, и их стандартные ошибки определения

Table 7. Estimates of the coefficients of the equation of timing associated with maneuvering the forwarder when loading the body, and their standard errors of determination

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	t-критерий
a_0	0,234873	0,00156375	150,198
a_1	1,43446	0,0504678	28,4232
a_2	-0,306392	0,0187012	-16,3835

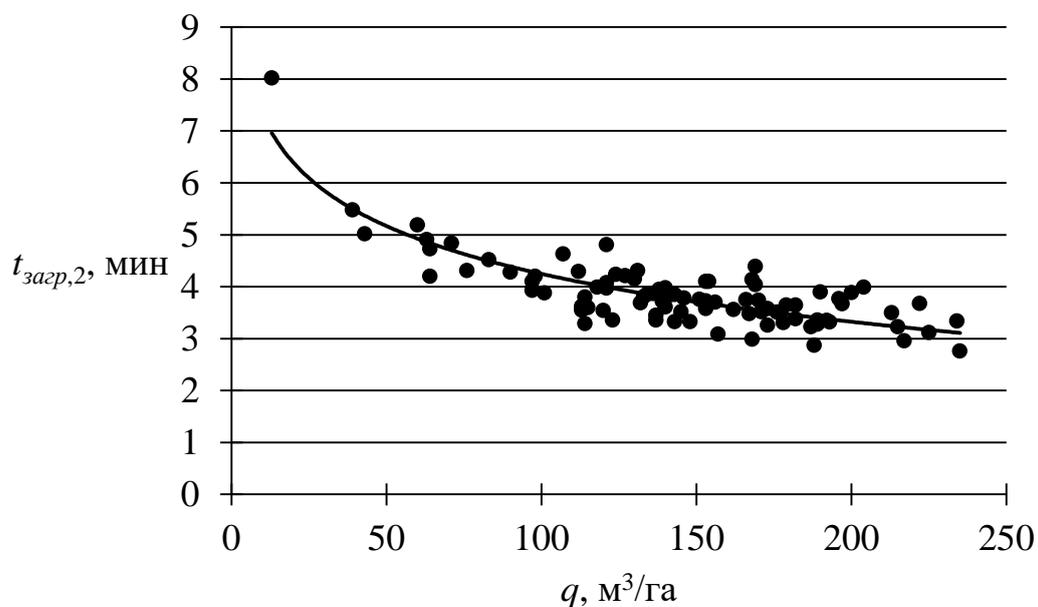


Рисунок 7. Затраты времени на загрузку кузова форвардера John Deere 1210G, связанные с маневрированием машины

Figure 7. Timing of loading the body of the John Deere 1210G forwarder due to machine maneuvering

Результаты экспериментов по изучению затрат времени на разгрузку кузова, связанных с работой манипулятора, для форвардера John Deere 1210G представлены на рисунке 8, для форвардера John Deere 1510G — на рисунке 9.

По результатам обработки опытных данных получим регрессионную зависимость:

$$t_{разгр,1} = a_0 + \frac{a_1}{\sqrt{n}}, \quad (16)$$
$$t_{разгр,1} = 12,241 + \frac{-22,841}{\sqrt{n}},$$

оценки коэффициентов уравнения регрессии и их стандартные ошибки определения представлены в таблице 8.

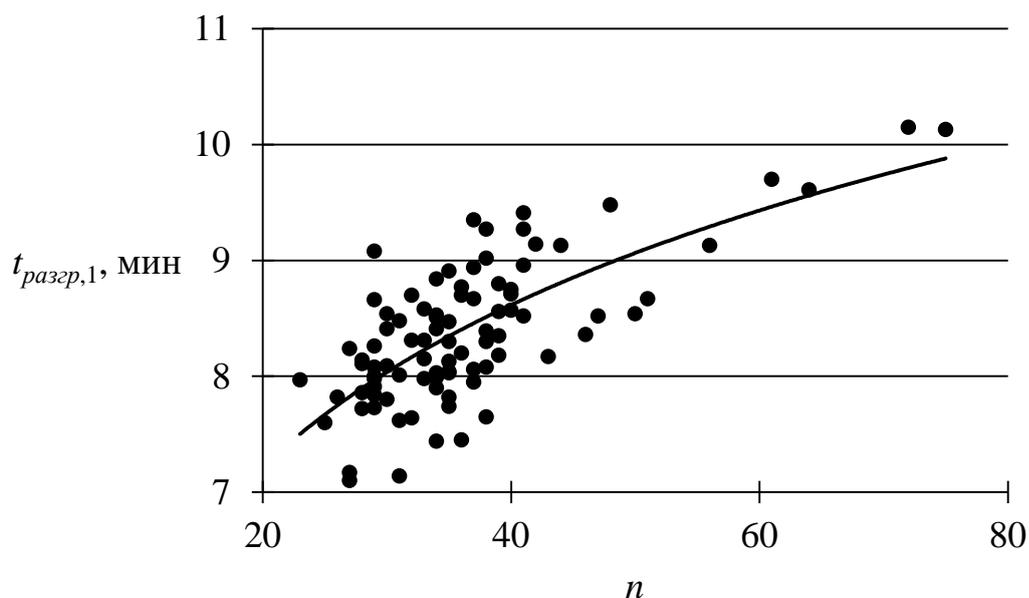


Рисунок 8. Затраты времени на разгрузку кузова форвардера John Deere 1210G, связанные с работой манипулятора

Figure 8. Timing of unloading the body of the John Deere 1210G forwarder associated with the operation of the manipulator

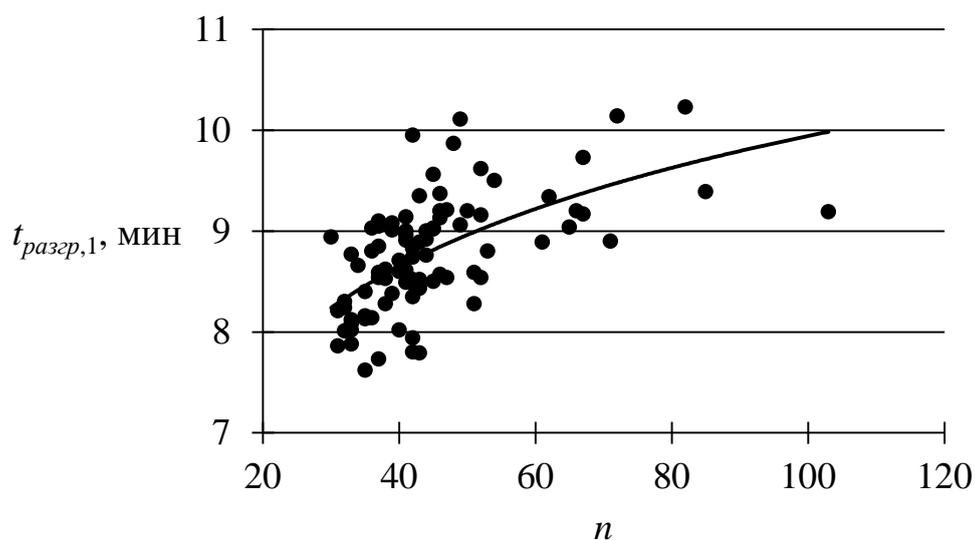


Рисунок 9. Затраты времени на разгрузку кузова форвардера John Deere 1510G, связанные с работой манипулятора

Figure 9. Timing of unloading the body of the John Deere 1510G forwarder associated with the operation of the manipulator

Таблица 8. Оценки коэффициентов уравнения затрат времени, связанных с работой манипулятора при разгрузке кузова, и их стандартные ошибки определения

Table 8. Estimates of the coefficients of the equation of timing associated with the operation of the manipulator when unloading the body, and their standard errors of determination

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	t -критерий
a_0	12,2413	0,285484	42,8792
a_1	-22,8410	1,76561	-12,9366

Статистический анализ показывает, что затраты времени на разгрузку кузова, связанные с маневрированием форвардера, для среднего и тяжёлого форвардера можем считать случайной нормально распределённой величиной с характеристиками, указанными в таблице 9.

Таблица 9. Затраты времени на разгрузку кузова, связанные с маневрированием форвардера

Table 9. Timing of unloading the body associated with maneuvering the forwarder

Значение	John Deere 1210G $t_{разгр,2}$, мин	John Deere 1510G $t_{разгр,2}$, мин
min	0,59	0,57
max	1,01	0,97
S	0,0760	0,0901
Среднее	0,781	0,786

В таблице 10 и на рисунках 10, 11 приведены основные статистические сведения по длинам маршрутов форвардера John Deere 1210G на пасечных и магистральных волоках, а также по затратам времени t_i , связанным с движением гружёного и порожнего форвардера.

Таблица 10. Длины маршрутов и затраты времени, связанные с движением форвардера John Deere 1210G

Table 10. Route lengths and timing associated with John Deere 1210G forwarder traffic

Значение	$l_1 \approx l_2$, м	$l_3 \approx l_4$, м	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	t_4 , мин
min	187	88	3,25	2,49	1,35	0,99
max	309	113	5,49	4,35	1,88	1,63
S	26,289	5,080	0,4640	0,3705	0,1081	0,1067
Среднее	249,22	99,69	4,31	3,31	1,60	1,25

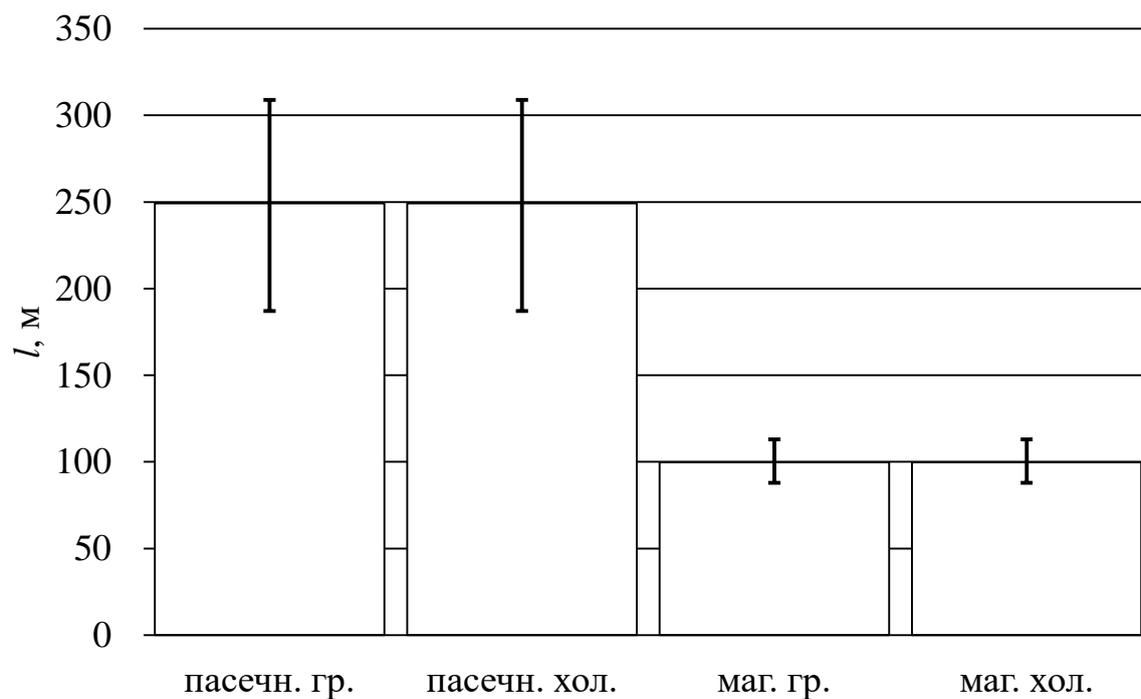


Рисунок 10. Длины маршрутов форвардера John Deere 1210G

Figure 10. John Deere 1210G forwarder route lengths

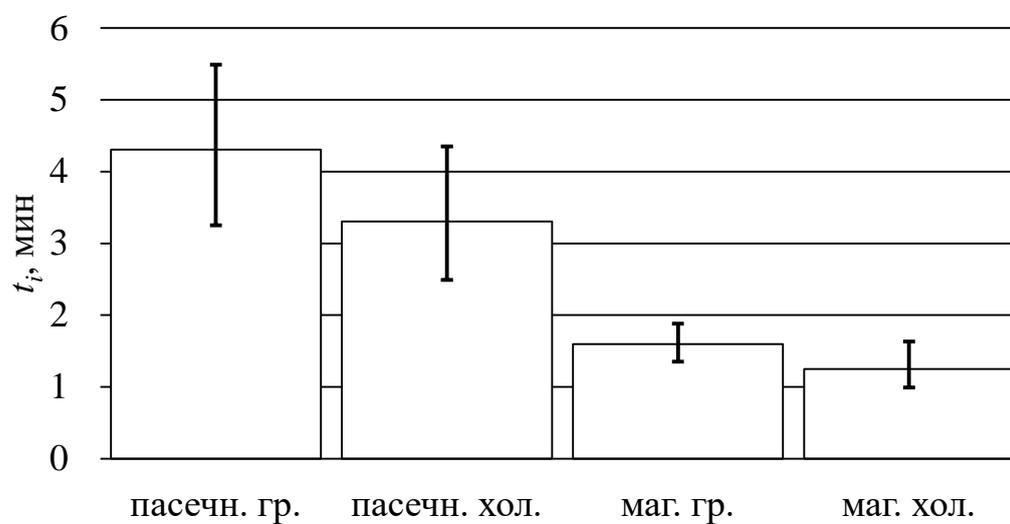


Рисунок 11. Затраты времени, связанные с движением форвардера John Deere 1210G

Figure 11. Timing associated with the movement of a forwarder John Deere 1210G

На основе данных о протяжённости маршрутов и затратах времени получены сведения о средних значениях скорости движения форвардера John Deere 1210G по отдельным участкам маршрута, представленные в таблице 11 и проиллюстрированные диаграммами на рисунке 13.

В таблице 12 сопоставлено значение расчётного времени цикла трелёвки T_0 , складывающегося из составляющих затрат времени по отдельным операциям цикла трелёвки и фактического времени цикла трелёвки T , замеренного экспериментально. На основе полученных данных рассчитан поправочный коэффициент φ_0 , учитывающий увеличение времени цикла трелёвки в связи с простоями машины.

Таблица 11. Сведения о скорости движения форвардера John Deere 1210G по отдельным участкам маршрута

Table 11. Information about the speed of the John Deere 1210G forwarder on individual sections of the route

Значение	v_1 , км/ч	v_2 , км/ч	v_3 , км/ч	v_4 , км/ч
min	3,08	3,76	3,25	4,06
max	4	5,17	4,16	5,64
S	0,169	0,263	0,173	0,285
среднее	3,48	4,53	3,75	4,80

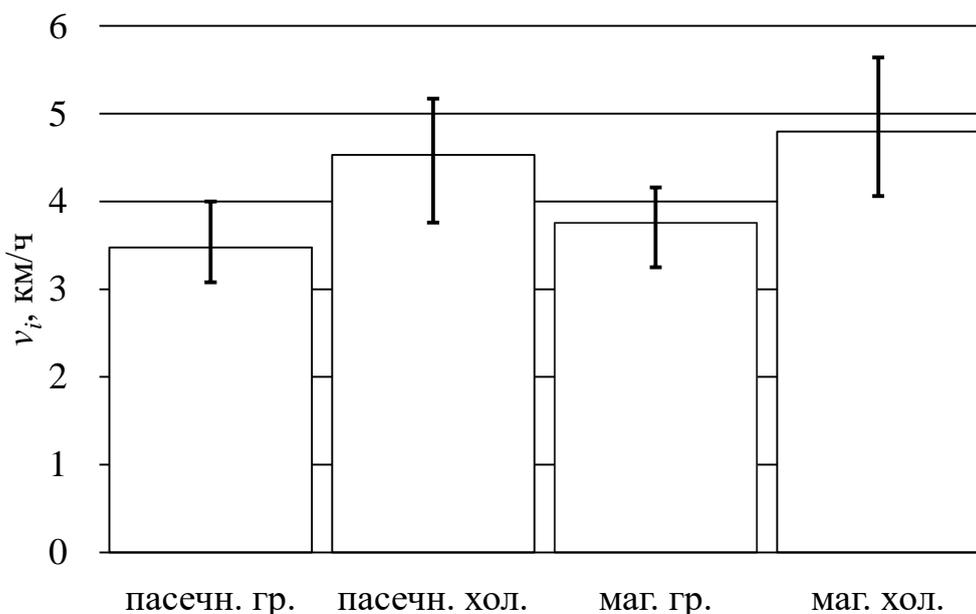


Рисунок 12. Скорости движения форвардера John Deere 1210G по отдельным участкам лесосеки

Figure 12. Speed of the John Deere 1210G forwarder on separate sections of the cutting area

Таблица 12. Сопоставление расчётного и фактического времени цикла трелёвки (форвардер John Deere 1210G)

Table 12. Comparison of estimated and actual skidding cycle times (John Deere 1210G forwarder)

Значение	T_0 , мин	T , мин	φ_0
min	32,17	42,4	1,194
max	67,9	94,31	1,472
S	6,0875	8,7353	0,0637
Среднее	42,82	57,21	1,34

Аналогично в таблице 13 и на рисунках 13, 14 приведены основные статистические сведения по длинам маршрутов форвардера John Deere 1510G на пасечных и магистральных волоках, а также по затратам времени t_i , связанным с движением гружёного и порожнего форвардера.

Таблица 13. Длины маршрутов и затраты времени, связанные с движением форвардера John Deere 1510G

Table 13. Route lengths and timing associated with John Deere 1510G forwarder traffic

Значение	$l_1 \approx l_2$, м	$l_3 \approx l_4$, м	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	t_4 , мин
min	201	78	4,29	3,05	1,44	1,07
max	329	102	7,13	5,32	2,27	1,51
S	25,144	4,600	0,5775	0,4299	0,1322	0,0903
Среднее	275,33	89,56	5,70	4,22	1,72	1,27

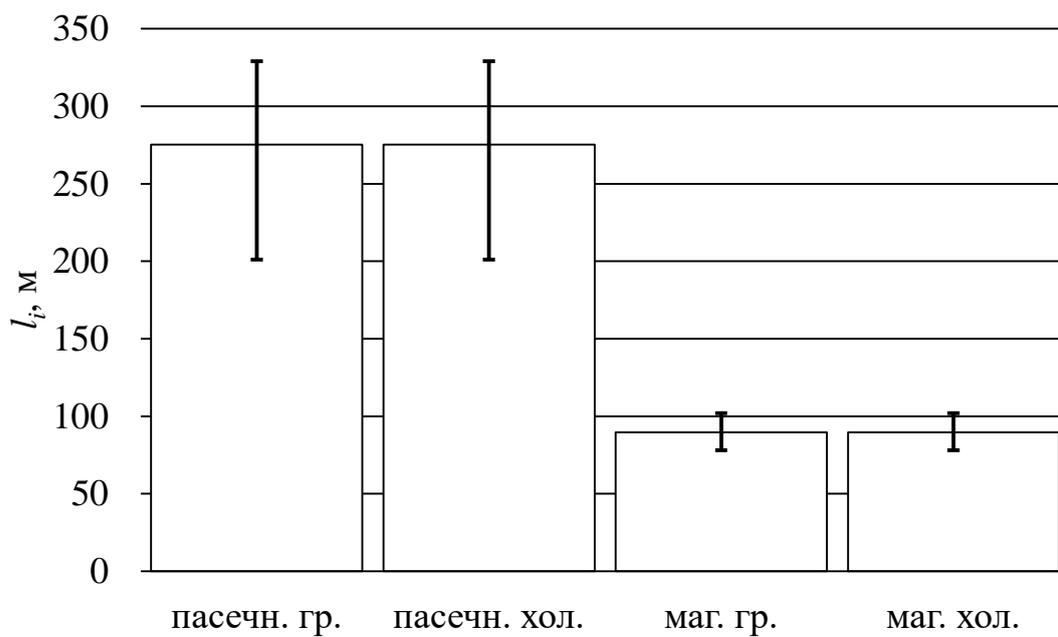


Рисунок 13. Длины маршрутов форвардера John Deere 1510G

Figure 13. John Deere forwarder route lengths 1510G

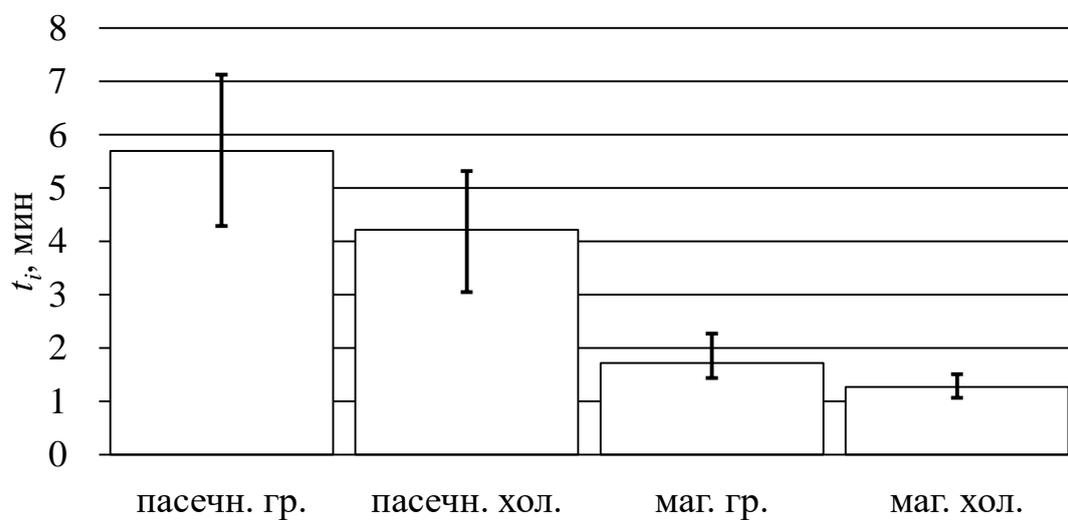


Рисунок 14. Затраты времени, связанные с движением форвардера John Deere 1510G

Figure 14. Timing associated with the movement of a forwarder John Deere 1510G

На основе данных о протяжённости маршрутов и затратах времени получены сведения о средних значениях скорости движения форвардера John Deere 1510G по отдельным участкам маршрута, представленные в таблице 14 и проиллюстрированные диаграммами на рисунке 15.

Таблица 14. Сведения о скорости движения форвардера John Deere 1510G по отдельным участкам маршрута

Table 14. Information about the speed of the John Deere 1510G forwarder on individual sections of the route

Значение	v_1 , км/ч	v_2 , км/ч	v_3 , км/ч	v_4 , км/ч
min	2,60	3,49	2,70	3,67
max	3,28	4,34	3,62	4,66
S	0,1515	0,1982	0,1617	0,2133
среднее	2,91	3,93	3,13	4,23

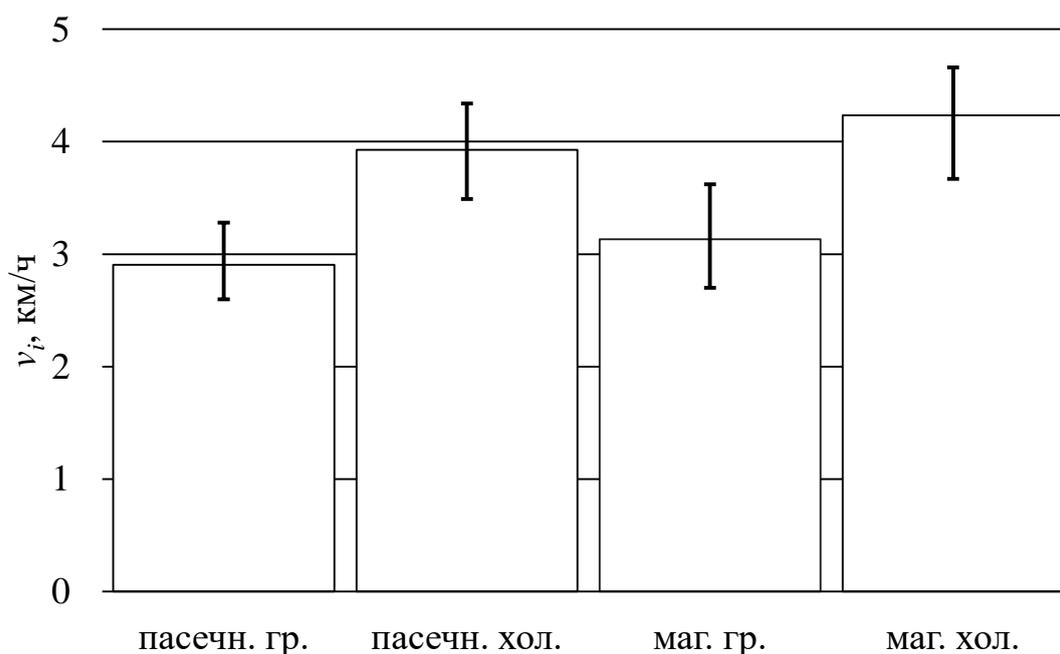


Рисунок 15. Скорости движения форвардера John Deere 1510G по отдельным участкам лесосеки

Figure 15. Speed of the John Deere 1510G forwarder on separate sections of the cutting area

В таблице 15 сопоставлено значение расчётного времени цикла трелёвки T_0 и фактического времени цикла трелёвки T . На основе полученных данных рассчитан поправочный коэффициент φ_0 , учитывающий увеличение времени цикла трелёвки в связи с простоями машины.

Таблица 15. Сопоставление расчётного и фактического времени цикла трелёвки (форвардер John Deere 1510G)

Table 15. Comparison of estimated and actual skidding cycle time (John Deere 1510G forwarder)

Значение	T_0 , мин	T , мин	φ_0
min	34,38	45,47	1,184
max	65,90	82,70	1,493
S	5,7081	7,5393	0,0643
среднее	43,33	57,21	1,322

В результате проведённых теоретических исследований была получена зависимость, позволяющая рассчитать допустимую нагрузку на колесо форвардера в зависимости от состояния грунта лесосеки, учитывающая возможность маневрирования машины:

$$P_{adm} = \left[\frac{h_{adm} E}{1,27 \cdot (1 + 0,0899\theta - 0,0012\theta^2)} \right]^{\frac{3}{2}}.$$

На основе теоретических исследований:

$$L = 1,015M - 4,1728,$$

$$V = \min \left\{ \frac{L}{\rho}; \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g} \right\}$$

определим допустимый объём трелюемых лесоматериалов в зависимости от эксплуатационных характеристик форвардера и грунтовых условий.

Далее оценка производительности проводится по формулам:

$$\Pi = \frac{3600V}{T},$$

$$T = \varphi_0 \cdot \left[l_{нс} \cdot \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right) + l_{мс} \cdot \left(\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4} \right) + t_{загр} + t_{разгр} \right],$$

$$t_{загр} = t_{загр,1} + t_{загр,2},$$

$$t_{разгр} = t_{разгр,1} + t_{разгр,2},$$

в которых составляющие затрат времени находятся по регрессионным зависимостям (12)—(16):

$$\begin{aligned}
 V_a &= a_0 + a_1 \ln V_x, \\
 n &= a_0 + a_1 \frac{V}{V_a}, \\
 t_{загр,1} &= a_0 V n, \\
 t_{загр,2} &= a_0 V^{a_1} q^{a_2}, \\
 t_{разгр,1} &= a_0 + \frac{a_1}{\sqrt{n}},
 \end{aligned}$$

а скорости форвардера на отдельных участках маршрута и поправочный коэффициент учёта технологических простоев принимаем с учётом экспериментально установленных границ варьирования. При необходимости скорости также могут быть оценены с использованием формул [12] и [13]:

$$\begin{aligned}
 N &= 9,0281M. \\
 v_i &= \min \left\{ \frac{N\eta}{F_i}; v_{i,мехн} \right\}.
 \end{aligned}$$

Для удобства сведём оценки коэффициентов уравнений регрессии (12)—(16), v_i , φ_0 и их стандартные ошибки в таблицу 16.

Далее реализуем разработанную математическую модель при варьировании её входных параметров в пределах, указанных в таблице 17.

При проведении вычислительного эксперимента параметры разыгрывали как случайные величины, равномерно распределённые в пределах, указанных в таблице 17. Далее получали функцию расчётной производительности форвардера в виде полинома:

$$\begin{aligned}
 \Pi &= b_0 + b_1 l_{не} + b_2 l_{ме} + b_3 q + b_4 V + b_5 V_x + \\
 &+ b_6 l_{не} l_{ме} + b_7 l_{не} q + b_8 l_{не} V + b_9 l_{не} V_x + b_{10} l_{ме} q + b_{11} l_{ме} V + b_{12} l_{ме} V_x + \\
 &+ b_{13} q V + b_{14} q V_x + b_{15} V V_x + b_{16} l_{не}^2 + b_{17} l_{ме}^2 + b_{18} q^2 + b_{19} V^2 + b_{20} V_x^2.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Таблица 16. Оценки коэффициентов уравнений регрессии, средних значений скоростей и их стандартные ошибки, используемые в вычислительном эксперименте по определению производительности форвардера

Table 16. Estimates of coefficients of regression equations, average values of velocities and their standard errors used in a computational experiment to determine the performance of the forwarder

Уравнение	Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка
(4.1)	a_0	0,297637	0,0039653
	a_1	0,103565	0,00576519
(4.2)	a_0	8,59353	0,868358
	a_1	0,428484	0,0109415
(4.3)	a_0	0,0226559	0,000182327
(4.4)	a_0	0,234873	0,00156375
	a_1	1,43446	0,0504678
	a_2	-0,306392	0,0187012
(4.5)	a_0	12,2413	0,285484
	a_1	-22,841	1,76561
—	$t_{разгр,2}$, МИН	0,786	0,0901
—	v_1 , КМ/Ч	3,48	0,169
—	v_2 , КМ/Ч	4,53	0,263
—	v_3 , КМ/Ч	3,75	0,173
—	v_4 , КМ/Ч	4,8	0,285
—	φ_0	1,34	0,0637

Таблица 17. Интервалы варьирования параметров математической модели

Table 17. Intervals of variation of mathematical model parameters

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
V_x , М ³	0,1	0,7
V , М ³	5	20
q , М ³ /Га	40	240
$l_{пв}$, КМ	0,05	0,25
$l_{мв}$, КМ	0,05	1

Результаты оценки коэффициентов функции (17) и стандартные ошибки их определения представлены в таблице 18.

Таблица 18. Результаты оценки коэффициентов функции (17) и стандартные ошибки их определения

Table 18. Results of estimation of coefficients of function (17) and standard errors of their determination

Коэффициент	Оценка	Станд. ошибка	t -критерий
b_0	7,69925	1,03899	7,41035
b_1	-16,3568	6,53724	-2,5021
b_2	-16,1144	1,17375	-13,729
b_3	0,0088942	0,006281	1,41606
b_4	0,848413	0,093062	9,11669
b_5	22,2532	2,03812	10,9185
b_6	16,7236	2,67835	6,244
b_7	0,0043401	0,012722	0,341142
b_8	0,344498	0,169629	2,03089
b_9	-13,2938	4,24072	-3,13479
b_{10}	-0,001158	0,002678	-0,43224
b_{11}	0,0945456	0,035711	2,6475
b_{12}	-8,99971	0,892783	-10,0805
b_{13}	-7,85E-05	0,00017	-0,46298
b_{14}	0,0067161	0,004241	1,58372
b_{15}	0,838897	0,056543	14,8365
b_{16}	-9,17209	17,9918	-0,50979
b_{17}	7,16033	0,797423	8,97934
b_{18}	-3,2E-05	1,8E-05	-1,77801
b_{19}	-0,035826	0,003199	-11,2007
b_{20}	-21,6257	1,99909	-10,8178

Руководствуясь расчётными значениями t -критериев, часть из них признаём незначимыми. В результате последовательного исключения наименее значимых параметров функции (17) получим окончательные оценки лишь значимых коэффициентов (таблица 19).

Таблица 19. Оценки коэффициентов уравнения (17) и их стандартные ошибки определения (после исключения незначимых параметров)

Table 19. Estimates of the coefficients of equation (17) and their standard errors of determination (after excluding insignificant parameters)

Коэффициент	Оценка	Станд. ошибка	<i>t</i> -критерий
b_0	8,24939	0,821257	10,0448
b_1	-18,5009	3,2441	-5,70292
b_2	-16,2765	1,11728	-14,568
b_4	0,837418	0,090388	9,26472
b_5	23,1934	1,95856	11,8421
b_6	16,7236	2,69048	6,21586
b_8	0,344498	0,170397	2,02174
b_9	-13,2938	4,25992	-3,12066
b_{11}	0,094546	0,035873	2,63556
b_{12}	-8,99971	0,896825	-10,0351
b_{15}	0,838897	0,056799	14,7696
b_{17}	7,16033	0,801033	8,93887
b_{19}	-0,03583	0,003213	-11,1503
b_{20}	-21,6257	2,00815	-10,769

Таким образом, математическое ожидание производительности форвардера найдём по уравнению

$$\begin{aligned} \Pi = & 8,25 - 18,5l_{ng} + 0,0945l_{mg}V - 9l_{mg}V_x + 0,839V_xV + 7,16l_{mg}^2 - 0,0358V^2 - \\ & - 16,3l_{mg} - 21,6V_x^2 + 0,837V + 23,2V_x + 16,7l_{ng}l_{mg} + 0,344l_{ng}V - 13,3l_{ng}V_x. \end{aligned} \quad (18)$$

Некоторые результаты расчётов, выполненных с использованием полученного уравнения (18), проиллюстрированы на рисунках 16—19.

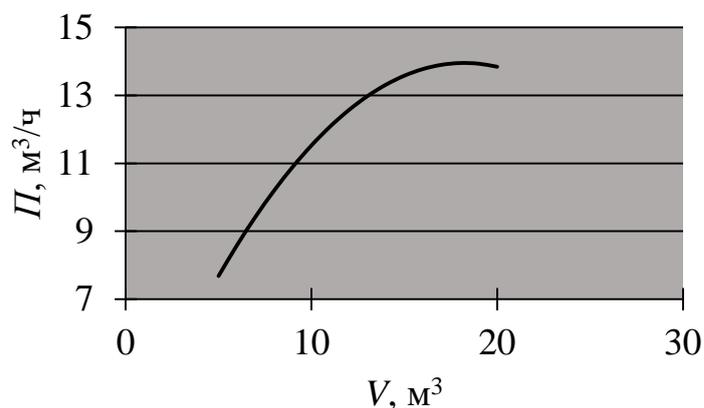


Рисунок 16. Часовая производительность форвардера в зависимости от объёма трелюемых лесоматериалов ($l_{нб} = 0,25$ км, $l_{мб} = 0,5$ км, $V_x = 0,4$ м³)

Figure 16. Hourly productivity of the forwarder, depending on the volume of skidded wood ($l_{нб} = 0,25$ km, $l_{мб} = 0,5$ km, $V_x = 0,4$ m³)

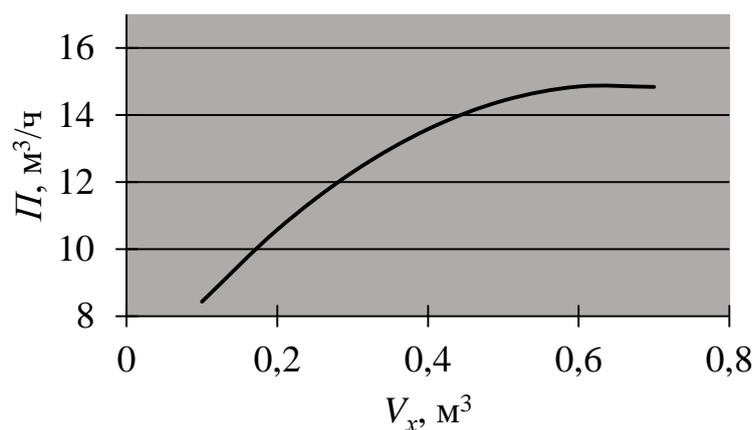


Рисунок 17. Часовая производительность форвардера в зависимости от среднего объёма хлыста ($l_{нб} = 0,25$ км, $l_{мб} = 0,5$ км, $V = 15$ м³)

Figure 17. Hourly performance of the forwarder depending on the average volume of the tree length ($l_{нб} = 0,25$ km, $l_{мб} = 0,5$ km, $V = 15$ m³)

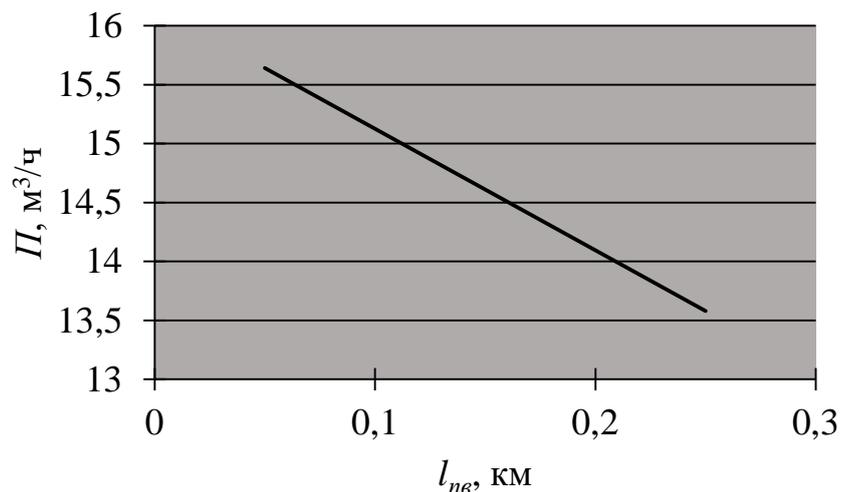


Рисунок 18. Часовая производительность форвардера в зависимости от длины пасечного волока ($l_{мс} = 0,5$ км, $V_x = 0,4$ м³, $V = 15$ м³)

Figure 18. Hourly productivity of the forwarider depending on the length of the skidding trail ($l_{мс} = 0,5$ km, $V_x = 0,4$ м³, $V = 15$ м³)

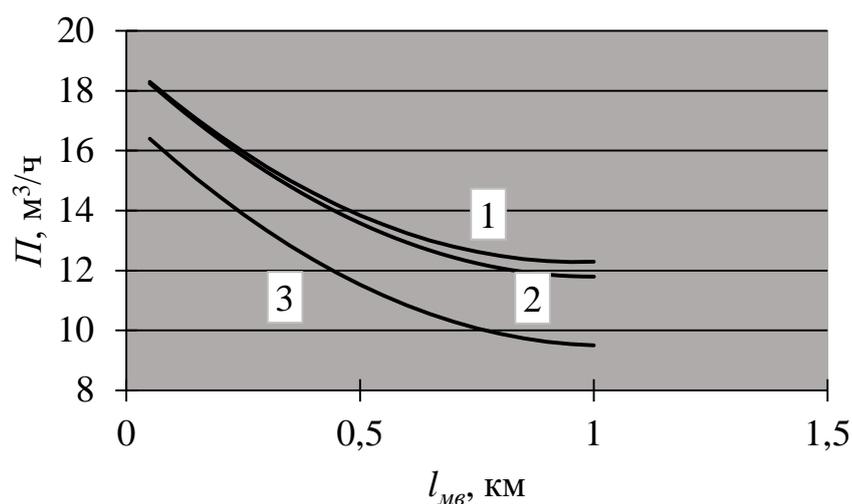


Рисунок 19. Часовая производительность форвардера в зависимости от длины магистрального волока ($l_{nb} = 0,25$ км, $V_x = 0,4$ м³, 1 — $V = 10$ м³, 2 — $V = 15$ м³, 3 — $V = 20$ м³)

Figure 19. Hourly capacity of the forwarider depending on the length of the main skid road ($l_{nb} = 0,25$ km, $V_x = 0,4$ м³, 1 — $V = 10$ м³, 2 — $V = 15$ м³, 3 — $V = 20$ м³)

Результаты расчётов наглядно раскрывают существенное влияние среднего объёма хлыста, длин пасечных и магистральных волоков на часовую производительность трелёвки. Важно отметить, что зависимость производительности от расстояния трелёвки при его увеличении до 1 км приобретает выраженный нелинейный характер. При этом производительность среднего форвардера (15 м^3) достаточно близка к производительности тяжёлого форвардера (20 м^3). Производительность лёгкого форвардера (10 м^3) отличается ориентировочно на 20 % в меньшую сторону. Для общего случая получим оптимальное значение объёма трелюемых лесоматериалов как максимум функции (18) по формуле

$$V_{opt} = 11,7 + 4,8l_{пв} + 1,32l_{мв} + 11,7V_x. \quad (19)$$

Подставляя значение V_{opt} по (19) в уравнения [12], [13]

$$V = \min \left\{ \frac{L}{\rho}; \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g} \right\},$$
$$h = 1,27 \cdot \left(\frac{P}{E} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot (1 + 0,0899\theta - 0,0012\theta^2),$$

найдем, что при $E = 1 \text{ МПа}$, $h_{adm} = 0,2 \text{ м}$, $\theta = 5^\circ$, получим рекомендуемую массу форвардера без груза $M_{рек} = 14 \text{ т}$.

4. Обсуждение и заключение

1. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать время выполнения отдельных операций цикла трелёвки форвардером в зависимости от природно-производственных условий; установлены доверительные границы изменения коэффициентов уравнений регрессии.

2. Результаты реализации имитационного подхода к моделированию и расчёту производительности форвардера раскрыли существенное влияние среднего объёма хлыста, длин пасечных и магистральных волоков на часовую производительность трелёвки. Важно отметить, что зависимость производительности от расстояния трелёвки при его увеличении до 1 км приобретает выраженный нелинейный характер. При этом производительность среднего форвардера (15 м^3) достаточно близка к производительности тяжёлого форвардера (20 м^3). Производительность лёгкого форвардера (10 м^3) отличается ориентировочно на 20 % в меньшую сторону.

3. На основе результатов имитационного моделирования получено уравнение, связывающее производительность трелёвки форвардером с длинами пасечных и магистральных волоков, параметрами древостоя и объёмом трелюемых лесоматериалов [формула (18)]. Для общего случая получено уравнение (19), устанавливающее оптимальное значение объёма трелюемых лесоматериалов. С учётом уравнений, полученных при теоретических исследованиях, с его использованием назначается рекомендуемая масса форвардера, связанная с грузоподъёмностью, в зависимости от грунтовых условий

и параметров маневрирования форвардера. Например, для почвогрунтов II категории прочности рекомендуемая масса форвардера составляет 14 т, при этом будет обеспечена грузоподъёмность машины, соответствующая оптимальному значению по производительности трелёвки, а глубина колеи не превысит допустимого значения 0,2 м.

Список литературы

1. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелёвочной системы с волоком / И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова, А. И. Жукова, Д. В. Лепилин, Г. Ю. Есин // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47—54.
2. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, V. Ivanov, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov // 14th in-ternational multidisciplinary scientific geoconfer-ence sgem 2014. Sofia, 2014. С. 407—414.
3. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, A. A. Prosuzhikh, I. N. Kruchinin, D. I. Shakirzyanov, V. V. Shvetsova, O. B. Markov, S. V. Egipko // Diagnostyka. 2020. Т. 21, № 2. С. 95—109.
4. Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В. Исследование влияния температуры мёрзлого почвогрунта на его свойства // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 3. С. 50—96. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5362.
5. Боровков А. А. Математическая статистика. М.: Наука, 1984. 472 с.
6. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. М., 2004. 462 с.
7. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ, 1997. 511 с.
8. Козлов А. Ю. Статистический анализ данных в MS Excel. М.: ИНФРА-М, 2014. 320 с.
9. Кубланов М. С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. М.: МГТУ ГА, 2004. 108 с.
10. Лагутин М. Б. Наглядная математическая статистика. М., 2007. 472 с.
11. Соколов Г. А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов: Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 200 с.
12. Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин / Е. Г. Хитров, А. А. Просужих, С. Е. Рудов, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 2. С. 45—79. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5282
13. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках / Л. Д. Бухтояров, В. В. Абрамов, А. А. Просужих, С. Е. Рудов, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 3. С. 1—35. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5283.

References

1. Grigorev I. V., Cygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Esin G. Y. Design of experiments in the study of the interaction of the system with portage. *Vestnik of Mari state technical University. Series: The Forest. Ecology. The use of natural resources*, 2011, no. 2, pp. 47—54. (In Russ.)

2. Grigorev I., Ivanov V., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost. *14th in-ternational multidisciplinary scientific geoconfer-ence sgem 2014*. Sofia, 2014, pp. 407—414.
3. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Kruchinin I. N., Shakirzyanov D. I., Shvetsova V. V., Markov O. B., Egipko S. V. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. *Diagnostyka*, 2020, t. 21, no. 2, pp. 95—109.
4. Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Investigation of the influence of frozen soil temperature on its properties. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 50—96. doi: 10.15393/j2.art.2020.5362. (In Russ.)
5. Borovkov A. A. *Mathematical statistics*. Moscow, Nauka, 1984. 472 p. (In Russ.)
6. Vukolov E. A. *Fundamentals of statistical analysis. Workshop on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL packages*. Moscow, 2004. 462 p. (In Russ.)
7. Zarubin V. S. *Mathematical modeling in technology*. Moscow, Publishing house of MSTU, 1997. 511 p. (In Russ.)
8. Kozlov A. Yu. *Statistical analysis of data in MS Excel*. Moscow, INFRA-M, 2014. 320 p. (In Russ.)
9. Kublanov M. S. *Mathematical modeling. Methodology and methods of development of mathematical models of mechanical systems and processes*. Moscow, MSTU GA, 2004. 108 p. (In Russ.)
10. Lagutin M. B. *Visual mathematical statistics*. Moscow, 2007. 472 p. (In Russ.)
11. Sokolov G. A. *Introduction to regression analysis and planning of regression experiments: Textbook*. Moscow, INFRA-M, 2010. 200 p. (In Russ.)
12. Khitrov E. G., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Research of interrelations of properties of soils as supporting surfaces of movement of forest machines. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 45—79. doi: 10.15393/j2.art.2020.5282. (In Russ.)
13. Bukhtoyarov L. D., Abramov V. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Analysis of structures and technologies of forwarders' work on logging. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 1—35. doi: 10.15393/j2.art.2020.5283. (In Russ.)