

## Обоснование границ варьирования эксплуатационных характеристик средоохраняющей лесной техники

М.А. Кокшаров<sup>1а</sup>, С.С. Петросян<sup>2б</sup>, А.Ю. Жук<sup>1с</sup>, М.М. Иготти<sup>2д</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, России

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5У, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>а</sup> maksont\_koksharov@mail.ru, <sup>б</sup> surik1622@gmail.com, <sup>с</sup> ftslk@brstu.ru, <sup>д</sup> m.igotti@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-1431-4189>

Статья поступила 16.01.2026, принята 05.02.2026

*Статья направлена на дальнейшее изучение эксплуатационных характеристик лесной техники на примере форвардеров и на уточнение классификации лесных машин для обоснования границ варьирования эксплуатационных характеристик средоохраняющей лесной техники. В результате выполненного анализа статистических данных получены уточнённые результаты, определяющие границы варьирования эксплуатационных характеристик средоохраняющей лесной техники по двум классам. Лёгкие форвардеры с массой в пределах 10,5–17,7 т, грузоподъёмность в пределах 6,1–12,7 т, оснащённые двигателями с мощностью 115–135 кВт и шириной кузова 2,2–3 м, условное давление движителя на грунт у которых находится в диапазоне 63–89 кПа; согласно предыдущим результатам, такие машины совместимы с лесными почвогрунтами средней прочности без оснащения съёмными гусеницами. Сверхлёгкие форвардеры, для которых оценки эксплуатационных параметров задаются нижней доверительной границей лёгкого класса, с массой менее 10,5 т и грузоподъёмностью до 6,1 т, двигатели с мощностью до 115 кВт, ширина кузова до 2,2 м, условное давление на почвогрунт менее 63 кПа; для машин с таким давлением на почвогрунт возможна работа на слабонесущих лесных почвогрунтах при условии оснащения съёмными гусеницами – условное давление на грунт составит менее 29 кПа. Среди перспективных направлений дальнейших исследований, в которые целесообразно интегрировать полученные в статье результаты, отмечены следующие: уточнение подхода к расчёту показателей воздействия лесной техники с учётом принятой схемы разработки лесосеки, её площади, и передвижения техники по неподготовленной почвенно-грунтовой поверхности под пологом леса; реализация моделей и оценка энергоэффективности трелёвки с учётом сопротивления движению и физико-механических свойств почвогрунта в вероятностной постановке.*

**Ключевые слова:** кластеризация; корреляции; линейная регрессия; масса машины; мощность двигателя машины.

## Justification of the boundaries of variation in the performance characteristics of environment-saving forestry machinery

M.A. Koksharov<sup>1а</sup>, S.S. Petrosyan<sup>2б</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>1с</sup>, M.M. Igotti<sup>2д</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5U, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

<sup>а</sup> maksont\_koksharov@mail.ru, <sup>б</sup> surik1622@gmail.com, <sup>с</sup> ftslk@brstu.ru, <sup>д</sup> m.igotti@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-1431-4189>

Received 16.01.2026, accepted 05.02.2026

*The article aims to further studying the performance characteristics of forestry equipment using forwarders as an example and to refine the classification of forestry machines to substantiate the boundaries of variation in the operational characteristics of environment-saving forestry equipment. As a result of the analysis of statistical data, refined results are obtained that determine the boundaries of variation in the operational characteristics of environment-friendly forestry equipment in two classes. Light forwarders weighing 10,5–17,7 t, with a payload capacity of 6,1–12,7 t, equipped with 115–135 kW engines and a body width of 2,2–3 m, and with a nominal ground pressure of 63–89 kPa; according to previous results, these machines are compatible with medium-hardness forest soils without the need for removable tracks. Ultra-light forwarders, for which the performance parameter estimates are specified by the lower confidence limit of the light class, with a mass of less than 10,5 t and a payload of up to 6,1 t, engines with a power of up to 115 kW, a body width of up to 2,2 m, and a nominal ground pressure of less than 63 kPa; for machines with such a ground pressure, operation on soft forest soils is possible, provided that they are equipped with removable tracks – the nominal ground pressure will be less than 29 kPa. Promising areas for further research into which the results obtained in this article could be integrated include: refining the approach to calculating forestry machinery impact indicators, taking into account the adopted logging site development plan, its area, and the movement of machinery over unprepared soil and ground surfaces under the forest canopy; implementing models and assessing*

the energy efficiency of skidding, taking into account movement resistance and the physical and mechanical properties of the soil in a probabilistic setting.

**Keywords:** clustering; correlations; linear regression; machine weight; machine engine power.

**Введение.** Известно, что технико-экономические показатели и экологичность заготовки и первичного транспорта древесины во многом определяются сочетанием технологии, эксплуатационных характеристик машин, её осуществляющих, а также природно-производственных условий [1–3]. В контексте развития средооадающих технологических процессов особенно важно учесть показатели повреждаемости корневой системы деревьев, оставляемых на доращивание, и лесной почвы, что, в свою очередь, требует тщательного обоснования и подбора параметров и режимов работы двигателей лесных машин [4, 5]. Развита теоретическая база для оценки экологической эффективности технологий заготовки и первичного транспорта леса [5–7], однако для реализации выдвинутых положений потребуются дальнейшие исследования, направленные на уточнение сведений об эксплуатационных характеристиках лесных машин, определяющих проходимость, производительность и показатели воздействия на почвогрунт; сведения должны быть сгруппированы для обоснования классов машин, совместимых с природно-производственными условиями при формулировании практических рекомендаций [5, 8].

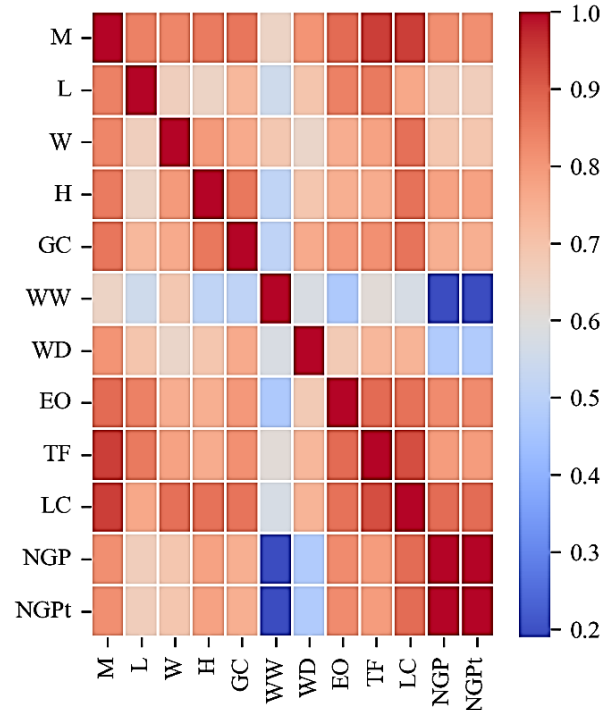
Статья направлена на дальнейшее изучение эксплуатационных характеристик лесной техники на примере форвардеров и уточнение классификации лесных машин для обоснования границ варьирования эксплуатационных характеристик средооадающей лесной техники.

**Материалы и методы.** Статистические данные для выполнения исследования собраны в базе данных [9]. Для 182 образцов машин изучены статистические данные по таким характеристикам, как масса машины, длина кузова, ширина кузова, высота кабины, дорожный просвет, ширина колеса, диаметр колеса, мощность двигателя, тяговое усилие, грузоподъёмность, условное давление на грунт, условное давление на грунт при оснащении съёмными гусеницами. При разработке уточнённой классификации лесных машин использованы результаты решения задачи машинного обучения без учителя – кластеризации данных по эксплуатационным характеристикам.

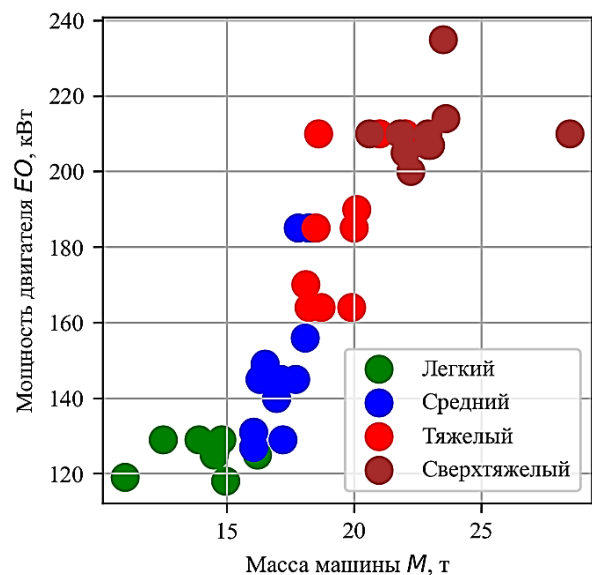
**Результаты исследования.** Приведём основные результаты выполненного анализа сведений производителей, собранных в базе данных [9]. На рис. 1 представлена тепловая карта матрицы коэффициентов корреляции основных параметров колёсных форвардеров.

Как показывают результаты расчёта коэффициентов линейной корреляции параметров машин, все они достаточно тесно связаны, в связи с чем возможно выделить какой-либо «ведущий» параметр и впоследствии для удобства реализации математических моделей использовать его для приближённой оценки прочих. Однако, перед данным шагом, сгруппируем модели форвардеров в кластеры, сохранив сведения по всем собранным характеристикам – ввиду сравнительно небольшой размерности задачи её решение не представляет существенных вычислительных сложностей [10, 11]. Для кластеризации используем алгоритм машинного

обучения  $k$ -средних [12–14], результаты представлены на рис. 2.



**Рис. 1.** Тепловая карта матрицы коэффициентов корреляции основных параметров колёсных форвардеров:  $M$  – масса машины;  $L$  – длина кузова;  $W$  – ширина кузова;  $H$  – высота кабины;  $GC$  – дорожный просвет;  $WW$  – ширина колеса;  $WD$  – диаметр колеса;  $EO$  – мощность двигателя;  $TF$  – тяговое усилие;  $LC$  – грузоподъёмность;  $NGP$  – условное давление на грунт;  $NGPt$  – условное давление на грунт при оснащении съёмными гусеницами



**Рис. 2.** Разметка моделей форвардеров по классам на основе кластеризации сведений об эксплуатационных характеристиках

Полученную разметку моделей по классам используем при визуализации функций эксплуатационных характеристик машин от массы  $M$ , выбранной в качестве ведущего признака с учётом положительного опыта, полученного ранее в [12–14] (рис. 3–13).

На рисунках также представлены функции-приближения эксплуатационных характеристик от массы, полученные в результате решения задачи метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - (c_0 + c_1 M_i))^2 \rightarrow \min_c, \quad (1)$$

где  $y$  – значения эксплуатационных характеристик.

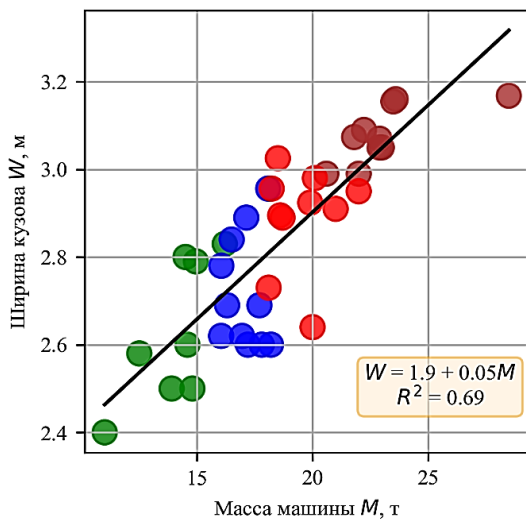


Рис. 3. Приближение функции ширины кузова от массы форвардера

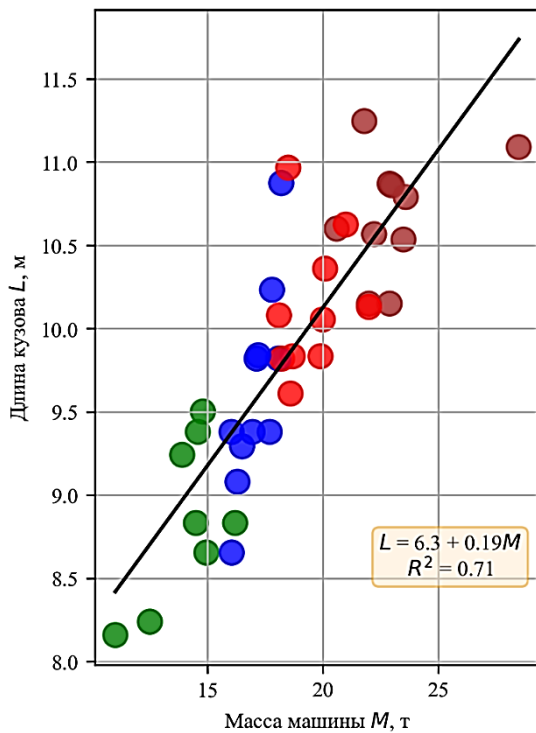


Рис. 4. Приближение функции длины кузова от массы форвардера

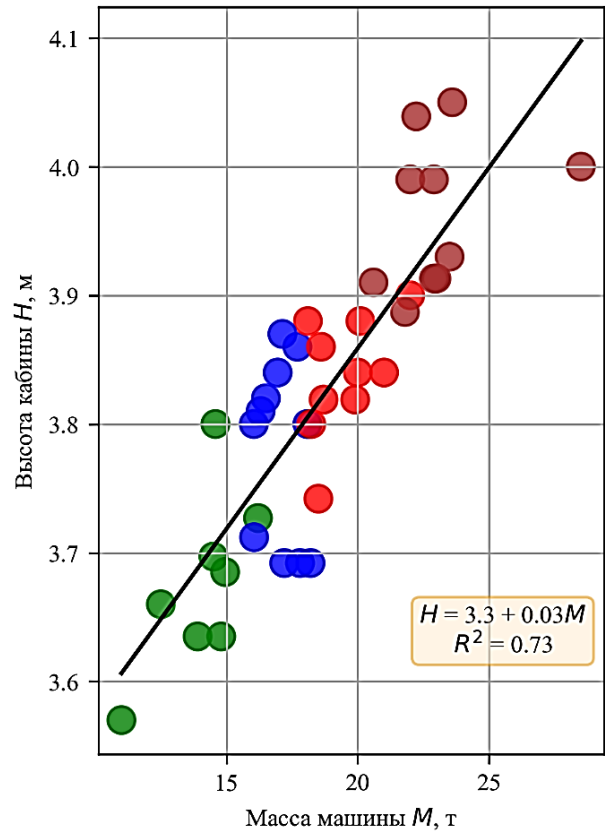


Рис. 5. Приближение функции высоты кабины от массы форвардера

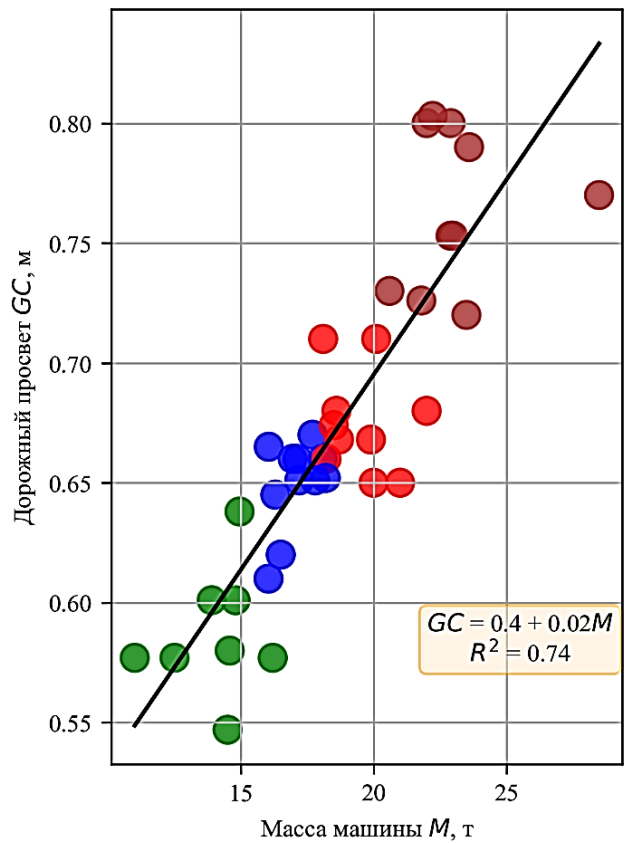


Рис. 6. Приближение функции дорожного просвета от массы форвардера

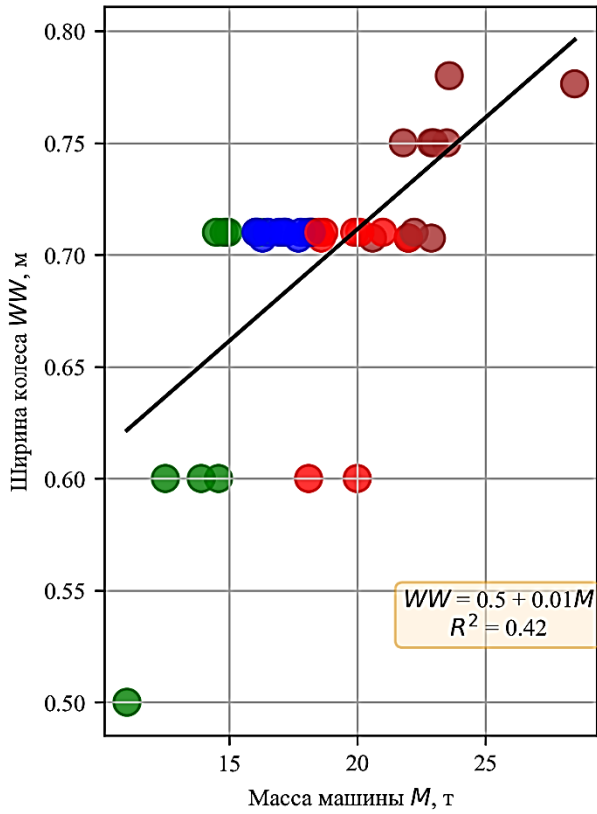


Рис. 7. Приближение функции ширины колеса от массы форвардера

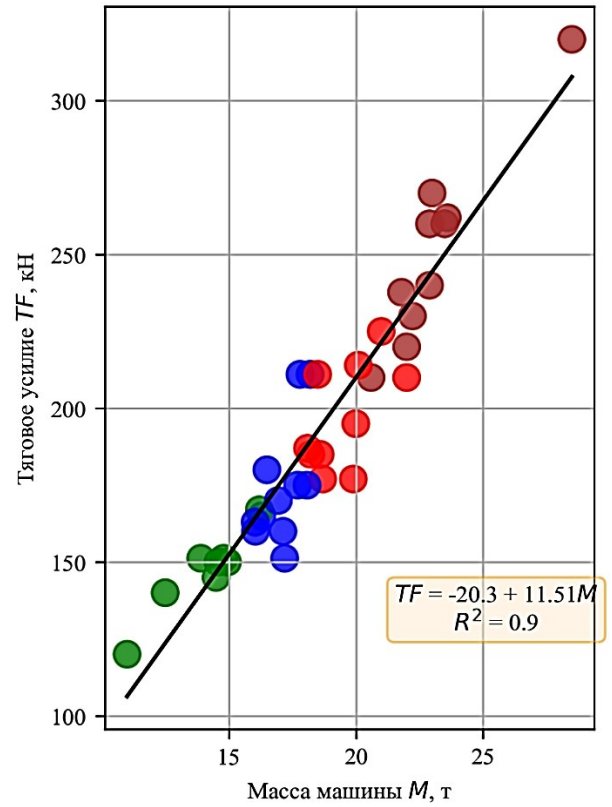


Рис. 9. Приближение функции тягового усилия от массы орвардера

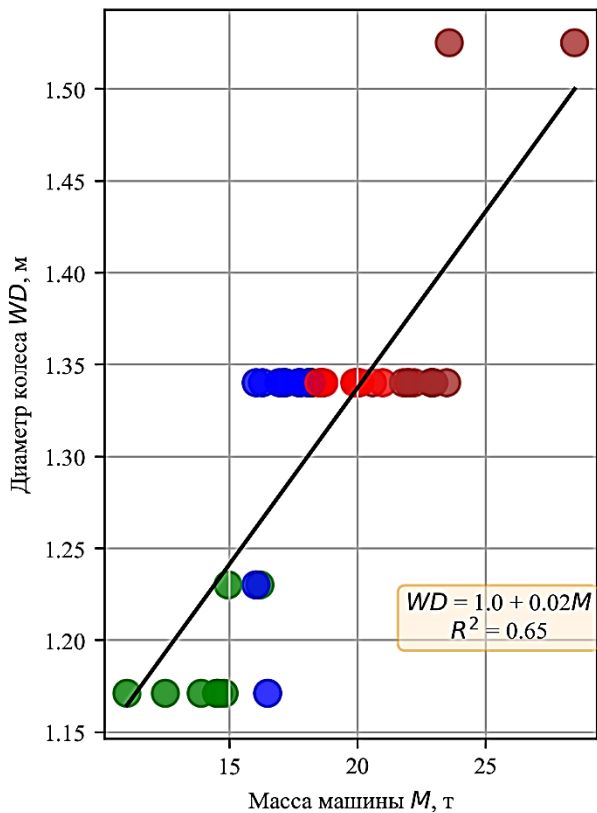


Рис. 8. Приближение функции диаметра колеса от массы орвардера

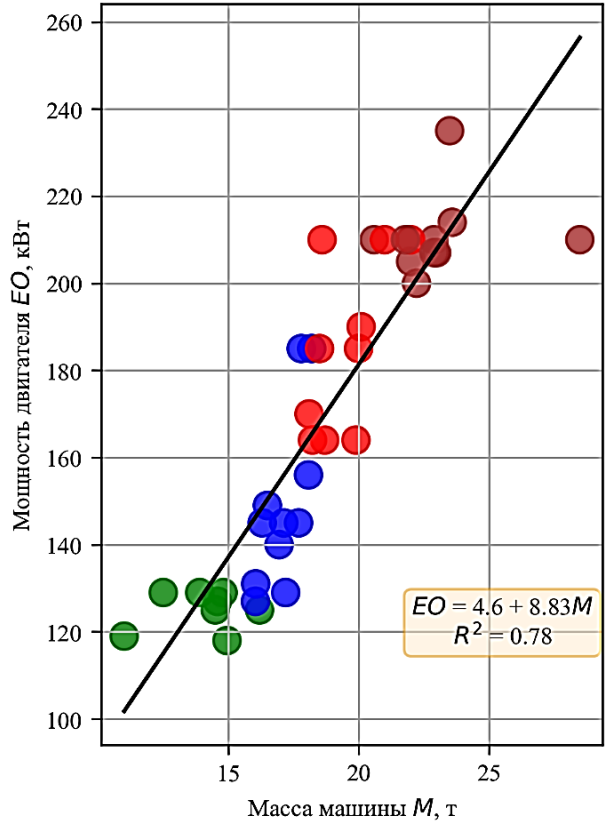


Рис. 10. Приближение функции мощности двигателя от массы форвардера

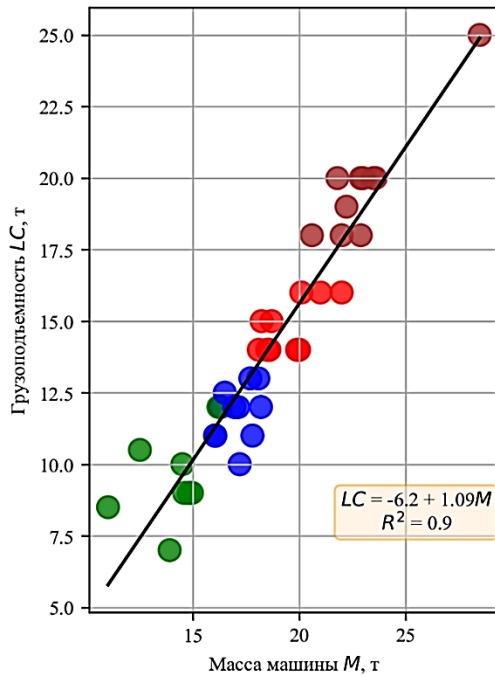


Рис. 11. Приближение функции грузоподъёмности от массы форвардера

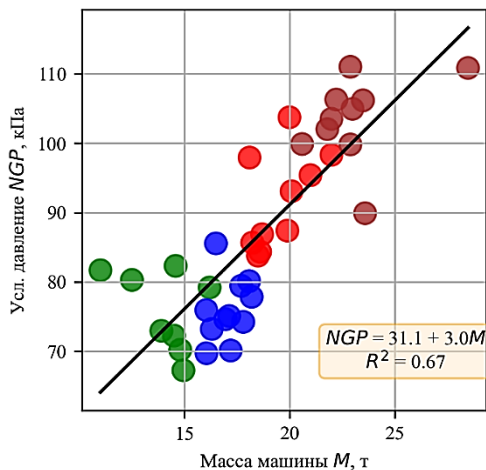


Рис. 12. Приближение функции условного давления двигателя от массы форвардера

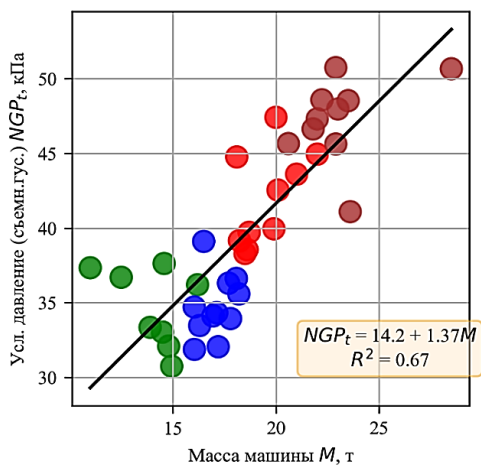


Рис. 13. Приближение функции условного давления двигателя от массы форвардера

Высокие оценки коэффициента детерминации (см. рис. 3–13) дополнительно подтверждают [12–14], что разметка моделей форвардеров по 4 группам-кластерам, внутри которых отмечаются схожие значения эксплуатационных параметров техники, устойчива. Обратим внимание на кластер с минимальным средним значением массы, обозначенный на рис. 2 как «Легкий». В табл. 1 приведены результаты расчёта параметров  $x$  нормального распределения характеристик машин внутри кластера:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}, \quad (2)$$

а также доверительные границы варьирования их значений по формуле:

$$\bar{x} = \mu + t \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, n - 2 \right) \sigma, \quad (3)$$

$$\underline{x} = \mu - t \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, n - 2 \right) \sigma,$$

где  $t$  – значение одностороннего  $t$ -распределения при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе моделей в кластере  $n$ .

Таблица 1. Результаты статистического анализа эксплуатационных характеристик форвардеров легкого класса

Параметр	$\mu$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\underline{x}$
$M$	14,1	1,61	17,7	10,5
$L$	8,9	0,5	10	7,8
$W$	2,6	0,16	3	2,2
$H$	3,7	0,07	3,9	3,5
$GC$	0,59	0,027	0,7	0,5
$WW$	0,64	0,079	0,8	0,5
$WD$	1,19	0,027	1,3	1,1
$EO$	125	4,4	135	115
$TF$	147	13,3	177	117
$LC$	9,4	1,48	12,7	6,1
$NPG$	76	5,8	89	63
$NPG_t$	35	2,6	41	29

Верхние и нижние оценки эксплуатационных характеристик  $\bar{x}, \underline{x}$  задают границы варьирования эксплуатационных характеристик машин в лёгком классе. При этом полагаем, что нижняя оценка позволяет обосновать значения эксплуатационных характеристик в «сверхлёгком» классе, и, таким образом, дополнить сведения о границах варьирования эксплуатационных характеристик перспективной средооадающей техникой.

**Заключение.** В результате выполненного анализа статистических данных получены уточнённые результаты, определяющие границы варьирования эксплуатационных характеристик средооадающей лесной техники по двум классам:

– лёгкие форвардеры с массой в пределах 10,5–17,7 т, грузоподъёмность в пределах 6,1–12,7 т, оснащённые двигателями с мощностью 115–135 кВт и шириной кузова 2,2–3 м, условное давление двигателя на грунт у которых находится в диапазоне 63–89 кПа; согласно

предыдущим результатам, такие машины совместимы с лесными почвогрунтами средней прочности без оснащения съёмными гусеницами;

– сверхлёгкие форвардеры, для которых оценки эксплуатационных параметров задаются нижней доверительной границей лёгкого класса, с массой менее 10,5 т и грузоподъёмностью до 6,1 т, двигатели с мощностью до 115 кВт, ширина кузова до 2,2 м, условное давление на почвогрунт менее 63 кПа; для машин с таким давлением на почвогрунт возможна работа на слабонесущих лесных почвогрунтах при условии оснащения съёмными гусеницами – условное давление на грунт составит менее 29 кПа.

#### Литература

1. Poršinsky T., Stankić I., Bosner A. Ecoefficient timber forwarding based on nominal ground pressure analysis // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2011. Т. 32. № 1. С. 345–356.
2. Horn R., Vossbrink J., Becker S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties // *Soil & Tillage Research*. 2004. Т. 79. № 2 SPEC.ISS. С. 207–219.
3. Vossbrink J., Horn R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties // *European Journal of Forest Research*. 2004. Т. 123. № 4. С. 259–267.
4. Линь Ф.Н. Многомодульное построение лесных колесных машин для лесного хозяйства Вьетнама // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2017. № 218. С. 145–152.
5. Gerasimov Y., Katarov V. Effect of bogie track and slash reinforcement on sinkage and soil compaction in soft terrains // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2010. Т. 31. № 1. С. 35–45.
6. Chamen T., Alakukku L., Pires S., Sommer C., Spoor G., Tijink F., Weisskopf P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review – part 2. Equipment and field practices // *Soil & Tillage Research*. 2003. Т. 73. № 1–2. С. 161–174.
7. Buchkina N.P. Impact of tracked vehicles on properties of tundra soils // *International symposium on physics, chemistry, and ecology of seasonally frozen soils*. 1997. С. 473–476.
8. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Анализ параметров колесных вездеходов для лесного хозяйства // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2020. № 9. С. 18–26.
9. Куницкая О.А., Михайлова Л.М., Григорьев И.В., Должиков И.С., Хитров Е.Г. Средства малой механизации: сельскохозяйственные и лесные машины и технологические агрегаты к ним (v.1.0) // *Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024622852*, 28.06.2024. Заявка № 2024622457 от 13.06.2024.
10. Zheng W., Chen W. K-means on application of means clustering in innovation and entrepreneurship sustainability education in universities // *International Journal of Computational Systems Engineering*. 2025. Т. 9. № 1/2/3.
11. Agbozo E. Web usability segmentation – applying k-means clustering to the system usability scale // *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Yekaterinburg, 2023. pp. 206–209.
12. Федосеева М.А., Киселев П.С., Наганов А.С., Петросян С.С., Шукин А.В., Хитров Е.Г. Классификация четырёхосных форвардеров на основе кластеризации данных в пространстве главных компонент // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. № 243. С. 240–252.
13. Сухов А.С., Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Друзьянова В.П., Теппов А.В., Задраускайте Н.О. Исследование моделей-классификаторов лесных машин на основе логистической регрессии // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. № 246. С. 297–310.
14. Андронов А.В., Петросян С.С., Егорин А.А., Ильюшенко Д.А., Хитров Е.Г. Классификация форвардеров с использованием кластеризации данных об их эксплуатационных характеристиках // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18. № 4. С. 1–16.
15. Poršinsky T., Matas J., Horvat D., Uka A. Tyres of forestry vehicles // *Sumarski List*. 2020. Т. 144. № 9–10.
16. Nugent C., Kanali C., Owende P.M.O., Nieuwenhuis M., Ward S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils // *Forest Ecology and Management*. 2003. Т. 180. № 1–3. С. 85–98.
17. Halvorson J.J., Gatto L.W., McCool D.K. Overwinter changes to near-surface bulk density, penetration resistance and infiltration rates in compacted soil // *Journal of Terramechanics*. 2003. Т. 40. № 1. С. 1–24.
18. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Ильюшенко Д.А., Пушкин Ю.Л. О сопоставлении среднего и номинального давления движителя лесной машины на почвогрунт // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. № 229. С. 185–195.
19. Labelle E.R., Jaeger D. Effects of steel flexible tracks on forwarder peak load distribution: results from a prototype load test platform // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2019. Т. 40. № 1. С. 1–23.
20. Halvorson J.J., McCool D.K., King L.G., Gatto L.W. Soil compaction and over-winter changes to tracked-vehicle ruts, Yakima training center, Washington // *Journal of Terramechanics*. 2001. Т. 38. № 3. С. 133–151.

#### References

1. Poršinsky T., Stankić I., Bosner A. Ecoefficient timber forwarding based on nominal ground pressure analysis // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2011. Т. 32. No. 1. P. 345–356.
2. Horn R., Vossbrink J., Becker S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties // *Soil & Tillage Research*. 2004. Т. 79. No. 2 SPEC.ISS. P. 207–219.
3. Vossbrink J., Horn R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties // *European Journal of Forest Research*. 2004. Т. 123. No. 4. P. 259–267.
4. Lin F.N. Multimodular design of forestry wheeled machines for the Vietnamese forestry sector // *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2017. No. 218. pp. 145–152.
5. Gerasimov Y., Katarov V. Effect of bogie track and slash reinforcement on sinkage and soil compaction in soft terrains //

- Croatian Journal of Forest Engineering. 2010. Vol. 31. No. 1. pp. 35–45.
6. Chamen T., Alakukku L., Pires S., Sommer C., Spoor G., Tijink F., Weisskopf P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review – part 2. Equipment and field practices // *Soil & Tillage Research*. 2003. Vol. 73. Nos. 1–2. pp. 161–174.
  7. Buchkina N.P. Impact of tracked vehicles on the properties of tundra soils // *International symposium on the physics, chemistry, and ecology of seasonally frozen soils*. 1997. pp. 473–476.
  8. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Grigorieva O.I., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A. Analysis of the parameters of wheeled all-terrain vehicles for forestry // *Repair. Restoration. Modernization*. 2020. No. 9. pp. 18–26.
  9. Kunitskaya O.A., Mikhailova L.M., Grigoriev I.V., Dolzhikov I.S., Khitrov E.G. Low-Mechanization Equipment: Agricultural and Forestry Machines and Technological Units for Them (v.1.0) // *Database Registration Certificate RU 2024622852*, June 28, 2024. Application No. 2024622457 dated June 13, 2024.
  10. Zheng W., Chen W. K-means on application of means clustering in innovation and entrepreneurship sustainability education in universities // *International Journal of Computational Systems Engineering*. 2025. T. 9. № 1/2/3.
  11. Agbozo E. Web usability segmentation – applying k-means clustering to the system usability scale // *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. Yekaterinburg, 2023. pp. 206–209.
  12. Fedoseeva M.A., Kiselev P.S., Naganov A.S., Petrosyan S.S., Shchukin A.V., Khitrov E.G. Classification of four-axle forwarders based on data clustering in the space of principal components // *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2023. No. 243. P. 240–252.
  13. Sukhov A.S., Khitrov E.G., Grigoriev I.V., Druzyanova V.P., Teppoev A.V., Zadrauskaite N.O. Study of classifier models of forest machines based on logistic regression // *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2023. No. 246. pp. 297–310.
  14. Andronov A.V., Petrosyan S.S., Egorin A.A., Ilyushenko D.A., Khitrov E.G. Classification of forwarders using clustering of data on their operational characteristics // *Resources and Technology*. 2021. Vol. 18. No. 4. pp. 1–16.
  15. Poršinsky T., Matas J., Horvat D., Uka A. Tires of forestry vehicles // *Sumarski List*. 2020. T. 144. No. 9–10.
  16. Nugent C., Kanali C., Owende P.M.O., Nieuwenhuis M., Ward S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils // *Forest Ecology and Management*. 2003. T. 180. No. 1–3. pp. 85–98.
  17. Halvorson J.J., Gatto L.W., McCool D.K. Overwinter changes to near-surface bulk density, penetration resistance and infiltration rates in compacted soil // *Journal of Terramechanics*. 2003. T. 40. No. 1. P. 1–24.
  18. Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Ilyushenko D.A., Pushkov Yu.L. On the comparison of the average and nominal pressure of a forest machine propeller on the soil // *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2019. No. 229. pp. 185–195.
  19. Labelle E.R., Jaeger D. Effects of steel flexible tracks on forwarder peak load distribution: results from a prototype load test platform // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2019. Vol. 40. No. 1. pp. 1–23.
  20. Halvorson J.J., McCool D.K., King L.G., Gatto L.W. Soil compaction and over-winter changes to tracked-vehicle ruts, Yakima training center, Washington // *Journal of Terramechanics*. 2001. T. 38. No. 3. P. 133–151.