

Интеллектуальный анализ параметров и классификация лесных и сельскохозяйственных колесных тракторов

И.С. Должиков^{1a}, П.А. Курочкин^{2b}, Е.Г. Хитров^{3c}, В.М. Дьяченко^{4d},
Л.М. Михайлова^{5e}, И.В. Григорьев^{5f}, С.И. Ревяко^{6g}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа, ул. Профсоюзная, 65, к. 1, Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Арктический государственный агротехнологический университет,
Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

⁶ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. Кортюнова,
ул. Пушкинская, 111, Новочеркасск, Россия

^a idolzhihov222@mail.ru, ^b pavel.a.kurochkin@yandex.ru, ^c yegorkhitrov@gmail.com,

^d Volodya.Dyachenko1986@mail.ru, ^e lyutsiya.losotova@mail.ru, ^f silver73@inbox.ru, ^g revyako77@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^b <https://orcid.org/0009-0006-8900-1975>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

^d <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, ^e <https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^g <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Статья поступила 14.03.2024, принята 22.04.2024

Колесные тракторы, используемые в лесозаготовительном производстве, сельском и лесном хозяйстве, отличаются большой вариативностью конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик. От них напрямую зависят показатели экологической эффективности — воздействия техники на окружающую среду (например, вес машины и параметры двигателя определяют глубину колеи и уплотнение почвогрунта) и эксплуатационной эффективности — производительности, энергоёмкости (так, например, грузоподъёмность и грузовая скорость машины во многом определяют время цикла трелевки). Подбор техники, наилучшим образом совместимой с природно-производственными условиями, параметры которой обеспечивают требуемые показатели экологической и эксплуатационной эффективности, является нетривиальной научно-практической задачей. Для упрощения процесса принятия решений при выборе машин предложены различные классификации техники, что позволяет рассматривать не каждую конкретную модель, а определённый класс с учетом типа природно-производственных условий. В настоящей статье проанализированы сведения о 102 моделях колесных тракторов с формулой 4x4. При обработке данных использован алгоритм кластеризации данных k-средних с метрикой Евклида (k-means). Число кластеров подобрано итерационным путем на основе результатов анализа функции суммарной ошибки разбиения объектов на кластеры (метрика inertia). Программа для проведения расчетов подготовлена на языке Python; расчеты выполнены в среде Google Colab, использована библиотека sklearn. Классификация предложена на основе обобщения результатов разметки объектов.

Ключевые слова: колесные лесные машины; колесные сельскохозяйственные машины; обучение без учителя; кластеризация; метод k-средних; метод главных компонент.

Intelligent analysis of parameters and classification of forest and agricultural wheeled tractors

I.S. Dolzhikov^{1a}, P.A. Kurochkin^{2b}, E.G. Khitrov^{3c}, V.M. Dyachenko^{4d},
L.M. Mikhailova^{5e}, I.V. Grigoriev^{5f}, S.I. Revyako^{6g}

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

² Scientific Research and Design Institute for Gas Processing; 65, Bld. 1, Profsoyuznaya St., Moscow, Russia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

⁵ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

⁶ Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. Kortunov; 111, Pushkinskaya St., Novocherkassk, Russia

^a idolzhihov222@mail.ru, ^b pavel.a.kurochkin@yandex.ru, ^c yegorkhitrov@gmail.com,

^d Volodya.Dyachenko1986@mail.ru, ^e lyutsiya.losotova@mail.ru, ^f silver73@inbox.ru, ^g revyako77@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^b <https://orcid.org/0009-0006-8900-1975>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

^d <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, ^e <https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^g <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Received 14.03.2024, accepted 22.04.2024

*Wheeled tractors used in logging, agriculture and forestry are characterized by a large variability of design parameters and operational characteristics. Environmental performance indicators directly depend on them - the impact of machinery on the environment (for example, the weight of the machine and the parameters of the propulsion determine the depth of the track and compaction of the soil) and operational efficiency - productivity, energy intensity (for example, the load capacity and cargo speed of the machine largely determine the time of the skidding cycle). Selection of equipment that is best compatible with natural production conditions, the parameters of which provide the required indicators of environmental and operational efficiency, is a non-trivial scientific and practical task. To simplify the decision-making process when choosing machines, various classifications of equipment are proposed, which makes it possible to consider not each specific model, but a certain class, taking into account the type of natural and industrial conditions. This article analyzes information about 102 models of wheeled tractors with the formula 4x4. When processing data, an algorithm for clustering *k*-means data with the Euclidean metric (*k*-means) is used. The number of clusters is selected iteratively based on the results of the analysis of the function of the total error of dividing objects into clusters (inertia metric). The calculation program is prepared in Python; calculations are performed in the Google Colab environment, the sklearn library is used. The classification is proposed on the basis of generalization of the results of object labeling.*

Keywords: wheeled forestry machines; wheeled agricultural machines; unsupervised learning; clustering; *k*-means method; principal component method.

Введение. Важность оптимального выбора машин для освоения лесосечного фонда в конкретных природно-производственных условиях не вызывает сомнений. Например, во времена СССР была широко известна рекомендация выбирать машины на базе тракторов Онежского тракторного завода (ОТЗ) для лесных насаждений со средним объемом хлыста до 0,4 м³ и на базе тракторов Алтайского тракторного завода (АТЗ) для насаждений со средним объемом хлыста более 0,4 м³.

К сожалению, этих заводов лесного машиностроения больше не существует, и в целом лесное машиностроение Российской Федерации находится в очень плачевном положении. Лесные машины отечественного производства оказались замещены импортными, с очень большой номенклатурой типоразмеров, производителей, конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик, включая и многоцелевые вездеходные машины [1; 2]. При этом рекомендации по оптимальному выбору лесных машин для определенных природно-производственных условий многими авторами формулируются в достаточно общем виде, например: колесные лесные машины «легкого» класса совместимы с лесными почвогрунтами III категории прочности [3–6]; для проведения рубок ухода за лесом, для лесопромышленного производства рекомендуется использовать тракторы малого класса тяги [7–9]; для сбора порубочных остатков, для борьбы с лесными пожарами желательно применять тракторы большого класса тяги [10–16] и т. п.

Границы варьирования эксплуатационных характеристик зачастую определяются путем деления размаха значений в выборке на число классов, принимаемое из общих соображений и практического опыта (например, «легкие», «средние» и «тяжелые» машины) [3; 17–19]. Число классов и подразделение машин в различных источниках могут различаться [20]. Эти различия можно объяснить большим числом

характеристик машин при сравнительно небольшом числе моделей техники определенного типа, что осложняет экспертную работу при составлении классификации. В этой связи для классификации был предложен подход, предполагающий использование методов интеллектуального анализа данных [3]. Подход основан на следующем предположении: эксплуатационные характеристики машин являются функциями инженерно-конструкторского опыта и технологии машиностроения. При этом модели машин группируются по схожести характеристик в кластеры, которые возможно выявить на основе алгоритмов машинного обучения с последующим вычислением метрик для проверки полученных результатов. Например, были предложены варианты классификации форвардеров и харвестеров с использованием алгоритма *k*-средних (*k*-means) [21; 22]. В качестве дальнейшего развития предложенного подхода в настоящей работе выполнен анализ данных, полученных для колесных сельскохозяйственных тракторов, которые также могут использоваться в качестве базовых машин для лесного хозяйства.

Цель работы состоит в том, чтобы предложить классификацию лесных и сельскохозяйственных колесных тракторов на основе интеллектуального анализа сведений об их конструктивных параметрах и эксплуатационных характеристиках.

Материалы и методы исследования. Данные для анализа получены в результате направленного поиска в сети Интернет (данные получены с веб-сайтов производителей техники и актуальны на 2024 г.). Рассмотрены сведения о 102-х моделях колесных тракторов с формулой 4x4. В качестве характеристик (признаков) моделей тракторов (объектов) использованы масса *M*, кг; мощность двигателя *N*, кВт; объем топливного бака *F_T*, л; максимальная скорость *V*, км/ч; длина *L*, мм; ширина *W*, мм, и высота машины *H*, мм; дорожный просвет *GC*, мм; ширина *FWW*, мм, и диаметр *FWD*, мм, колес передней оси; ширина *RWW*, мм, и диаметр *RWD*, мм, колес задней

оси. Предварительная обработка данных опционально включала в себя центрирование, стандартизацию, отображение матрицы признаков (характеристик машин) в пространство главных компонент (снижение размерности). При обработке данных использован алгоритм кластеризации данных k -средних с метрикой Евклида (k -means). Число кластеров подобрано итерационным путем на основе результатов анализа функции суммарной ошибки разбиения объектов на кластеры (метрика *inertia*). Программа для проведения расчетов подготовлена на языке *Python*; расчеты выполнены в среде *Google Colab*, использована библиотека *sklearn* [23]. Классификация предложена на основе обобщения результатов разметки объектов.

Результаты исследования. В полученном наборе данных присутствуют значения 12-ти эксплуатационных характеристик (признаков) 102-х колесных тракторов (объектов). Основные статистические характеристики и коэффициенты линейной корреляции признаков приведены в табл. 1 и 2.

Как правило, тесно коррелированные признаки исключают из рассмотрения. Однако в качестве альтернативы исключению возможно снизить размерность признакового пространства при помощи метода главных компонент [24]:

$$X_{n,m}R_{m,d} = K_{n,d}, \quad (1)$$

где X — исходная матрица признаков объектов; R — матрица поворота; K — матрица главных компонент; n — число строк (объектов, моделей машин); m — исходное число признаков; d — число главных компонент.

Матрица X составлена из стандартизованных значений 12-ти признаков 102-х объектов ($n = 102, m = 12$). Главные компоненты, с некоторой долей условности, являются «приведенными» признаками объектов. Матрица преобразования подбирается таким образом, чтобы обеспечить возможность максимально точно восстановить X при обратном преобразовании в пространство с исходной размерностью [25]:

$$R = \arg \min_{M^{n,d}} \|KR^T - X\|_2. \quad (2)$$

Таким образом, в методе главных компонент максимизируется доля сохраненной вариации признаков [23–25].

Последнее имеет место в случае, если [24; 25]:

$$R = \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_d \\ | & & | \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где v_j — правые сингулярные векторы, полученные в результате разложения матрицы ковариации признаков C :

$$C = \begin{bmatrix} | & & | \\ u_1 & \dots & u_m \\ | & & | \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_m \\ | & & | \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где σ_j — сингулярные числа; u_j — левые сингулярные векторы.

Число главных компонент d определим по оценке доли дисперсии признаков, сохраненной при преобразовании (1) [25]:

$$CVR = \frac{\sum_{j=1}^d \sigma_j}{\sum_j \sigma_j}. \quad (5)$$

Для матрицы стандартизованных признаков получим оценки CVR , приведенные в табл. 3.

Для наглядности проиллюстрируем результаты, приведенные в табл. 3, графиком на рис. 1.

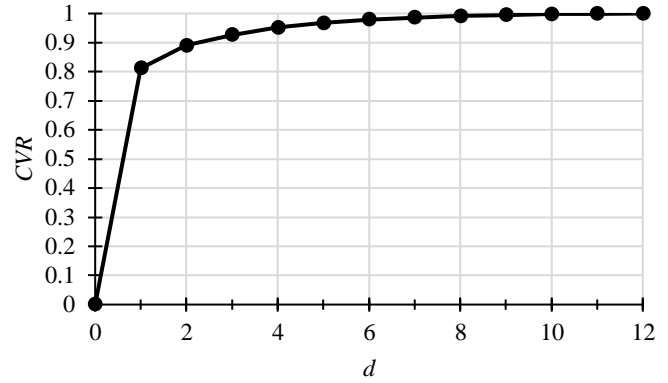


Рис. 1. Доля сохраненной дисперсии при переходе в пространство главных компонент

Результаты расчета показывают, что при использовании 4-х сингулярных векторов матрицы C для составления матрицы поворота R удается сохранить более 95 % дисперсии признаков X . Таким образом, продолжим анализ в пространстве 4-х главных компонент («приведенных» признаков) и решим задачу оптимального разбиения объектов на кластеры.

Для этого требуется подобрать разметку объектов y таким образом, чтобы минимизировать суммарное значение расстояний от объектов до центроидов кластеров [25]:

$$s = \arg \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_i\|_2^2, c_i = \frac{1}{\|S_i\|_1} \sum_{y \in S_i} y \quad (6)$$

где c — векторы координат центроидов кластеров (подбираются итерационным путем); x — векторы координат объектов (в решаемой задаче — в пространстве 4-х главных компонент); s — векторы разметки (координаты представляют собой индикаторные функции, обозначающие принадлежность объекта к i -му кластеру); $s = \{s_1, \dots, s_k\}$; k — число кластеров.

Специфика решаемой задачи такова, что однозначно определить число кластеров, образованных объектами, невозможно (обучение без учителя [25]). Вместо этого предложим их некоторое разумное, с точки зрения практической применимости разрабатываемой классификации, количество. Рассмотрим сумму расстояний I от объектов до центроидов в зависимости от числа кластеров k (метрика *inertia*) [24; 25]:

$$I = \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_i\|_2^2 \quad (7)$$

Результаты расчетов ошибки I приведены в табл. 4 и на рис. 2.

По таблице и графику можем заметить, что при числе $N \geq 4$ ошибка I уменьшается практически линейно, и дальнейшее подразделение объектов на большее число кластеров нецелесообразно [23–25]. В противном случае происходит разделение на кластеры объектов со сравнительно однородно распределенными признаками.

На основе полученной разметки объектов рассчитаны статистики признаков по кластерам, приведенные в табл. 5. Эти сведения ложатся в основу предлагаемой классификации машин.

Полученная разметка объектов в виде проекции на две главные компоненты проиллюстрирована на рис. 3.

На графике можем заметить, что кластеры практически не пересекаются, что можно признать удовлетворительным результатом. На рис. 4 приведены сведения о массе и мощности двигателей машин с учетом полученной разметки моделей тракторов.

Также заметим, что в полученной разметке кластеры обособлены по важнейшим характеристикам машин — массе и мощности двигателя.

Для практического использования обобщим результаты, представленные в табл. 5, и предложим классификацию колесных тракторов 4x4 в соответствии с табл. 6. В таблице границы варьирования характеристик в классах получены пропорционально стандартным отклонениям признаков в соседних кластерах:

$$\begin{aligned} \max x_{j,k} &= \mu_{j,k} + (\mu_{j,k+1} - \mu_{j,k}) \frac{S_{j,k}}{S_{j,k+1}} \\ &= \min x_{j,k+1}, \end{aligned} \quad (8)$$

Для сверхлегких и тяжелых машин соответственно нижняя и верхняя границы определены по формуле:

$$\begin{aligned} \min x_{j,0} &= \max\{\min x_{j,0}; \mu_{j,0} - 2S_{j,3}\}, \max x_{j,3} \\ &= \mu_{j,3} + 2S_{j,3} \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 1. Основные статистические характеристики выборки данных для анализа

Значение	M	FT	N	V	L	W	H	GC	FWW	FWD	RWW	RWD
μ	2 896	102	66,9	30,8	3 766	1 756	2 446	352	244	923	337	1 256
S	2 993	123	69,8	9,2	1 006	550	517	68	116	299	112	314
min	470	6,1	13	1,6	2 400	1 000	1 190	210	127	420	140	420
max	18 630	716	440	50	8 100	4 190	4 100	540	710	2 079	710	2 042

В таблице обозначено: μ — среднее арифметическое значение; S — выборочное стандартное отклонение; min — минимальное значение признака; max — максимальное значение признака.

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции признаков в выборке

	M	FT	N	V	L	W	H	GC	FWW	FWD	RWW	RWD
M	1,00	0,97	0,96	0,34	0,95	0,94	0,77	0,64	0,92	0,89	0,86	0,78
FT	0,97	1,00	0,96	0,30	0,92	0,91	0,74	0,67	0,90	0,89	0,85	0,79
N	0,96	0,96	1,00	0,38	0,93	0,90	0,76	0,67	0,92	0,90	0,88	0,79
V	0,34	0,30	0,38	1,00	0,40	0,41	0,45	0,45	0,41	0,48	0,46	0,55
L	0,95	0,92	0,93	0,40	1,00	0,94	0,83	0,73	0,93	0,93	0,92	0,86
W	0,94	0,91	0,90	0,41	0,94	1,00	0,77	0,71	0,89	0,91	0,88	0,85
H	0,77	0,74	0,76	0,45	0,83	0,77	1,00	0,70	0,80	0,80	0,79	0,78
GC	0,64	0,67	0,67	0,45	0,73	0,71	0,70	1,00	0,73	0,77	0,78	0,83
FWW	0,92	0,90	0,92	0,41	0,93	0,89	0,80	0,73	1,00	0,95	0,94	0,84
FWD	0,89	0,89	0,90	0,48	0,93	0,91	0,80	0,77	0,95	1,00	0,93	0,91
RWW	0,86	0,85	0,88	0,46	0,92	0,88	0,79	0,78	0,94	0,93	1,00	0,93
RWD	0,78	0,79	0,79	0,55	0,86	0,85	0,78	0,83	0,84	0,91	0,93	1,00

Таблица 3. Доля сохраненной дисперсии при переходе в пространство главных компонент

d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CVR, %	81,2	89	92,7	95,2	96,7	97,9	98,6	99,1	99,5	99,8	99,9	100

Таблица 4. Сумма расстояний от объектов до центроидов в зависимости от числа кластеров

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	1 165,0	495,8	342,2	211,2	165,8	150,6	131,2	117,6	102,2	87,8

Таблица 5. Статистики признаков объектов при подразделении на 4 кластера

Кластер	0		1		2		3	
	μ (S)	min – max	μ (S)	min – max	μ (S)	min – max	μ (S)	min – max
M, кг	1 212,9 (315)	470–1849,4	2251,3 (658,4)	1205–4000	5 491,1 (1807,3)	2666–9450	16 070 (4434,1)	10950–18630
N, кВт	25,7 (5,7)	13–40	53,4 (16,3)	24–90	129,2 (50,9)	78–240	366,7 (70,2)	300–440

Кластер	0		1		2		3	
	$\mu (S)$	min – max	$\mu (S)$	min – max	$\mu (S)$	min – max	$\mu (S)$	min – max
FT, л	38,5 (27,7)	6,1–180	66,5 (31,3)	27–136,7	221,7 (100,5)	78–400	603,7 (126,4)	467,1–716,5
V, км/ч	23,5 (9)	1,6–49,4	34,2 (5,9)	24,1 - 50	37,4 (5,3)	30,9 - 47,9	37 (1,7)	36 - 39
L, мм	3 014 (280)	2400–3500	3 661 (309)	2930–4200	4 898 (511)	3 980–5730	7 393 (1224)	5980–8100
W, мм	1 372 (162)	1000–1630	1 683 (193)	1390–2445	2 351 (320)	1 893–3280	3757 (751)	2890–4190
H, мм	2 035 (366)	1190–2610	2 472 (258)	1590–2800	2 983 (175)	2 640–3230	3 860 (416)	3380–4100
GC, мм	298 (38)	210–390	352 (40)	230–430	438 (45)	366–540	473 (40)	450–520
FWW, мм	161 (21)	127–205	226 (39)	175–400	380 (67)	284–540	670 (35)	650–710
FWD, мм	698 (90)	420–895	879 (83)	760–1105	1 295 (135)	1 105–1685	1 968 (96)	1913–2079
RWW, мм	245 (39)	140–315	333 (44)	241–418	475 (66)	418–650	670 (35)	650–710
RWD, мм	979 (148)	420–1160	1 261 (143)	782–1575	1 682 (110)	1 466–1838	1 956 (74)	1913–2042

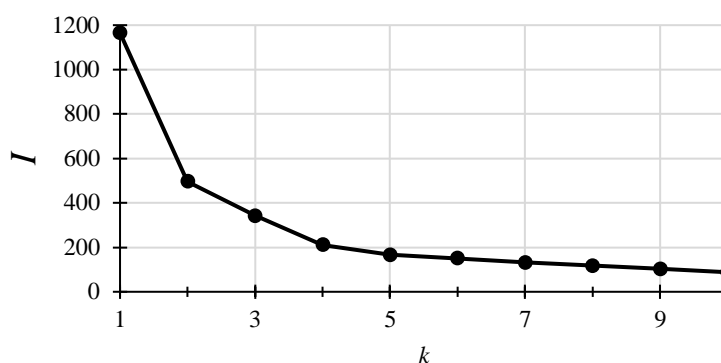


Рис. 2. Сумма расстояний от объектов до центроидов в зависимости от числа кластеров

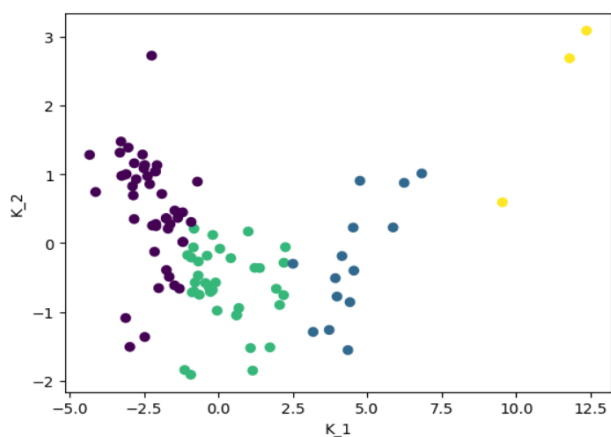


Рис. 3. Разметка объектов по кластерам (проекция на две главные компоненты)

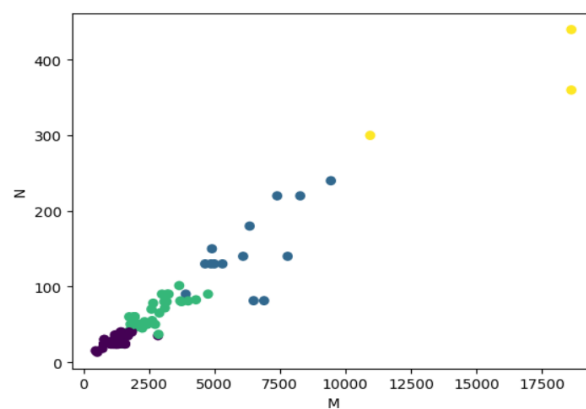


Рис. 4. Масса и мощность двигателя машин с учетом полученной разметки

Таблица 6. Предлагаемая классификация колесных тракторов 4x4

Класс	Сверхлегкие	Легкие	Средние	Тяжелые
M, кг	600–1700	1700–3400	3400–9800	9800–18600
N, кВт	15–35	35–80	80–300	300–440
FT, л	5–65	65–115	115–525	525–715
V, км/ч	5–40	40–40	40–35	35–40
L, мм	2500–3600	3600–4400	4400–5900	5900–8100
W, мм	1000–1600	1600–2100	2100–3000	3000–4200
H, мм	1300–2700	2700–3200	3200–3400	3400–4100
GC, мм	220–350	350–430	430–480	480–520
FWW, мм	100–200	200–300	300–700	700–900
FWD, мм	500–900	900–1100	1100–2100	2100–2200
RWW, мм	200–300	300–400	400–700	700–800

Класс	Сверхлегкие	Легкие	Средние	Тяжелые
RWD, мм	700–1300	1300–1800	1800–2000	2000–2100

Выводы. Тип техники оказывает значительное влияние на показатели, конструктивные параметры и технологические показатели используемых на лесосечных и лесохозяйственных работах машин, степень их соответствия конкретным природно-производственным условиям, оказывает очень существенное влияние на экологическую и эксплуатационную эффективность. В результате интеллектуального анализа конструктивных параметров сформулирована классификация лесных и сельскохозяйственных колесных тракторов, включающая в себя четыре класса (табл. 6), которая

позволяет оптимизировать выбор техники под конкретные природно-производственные условия ее применения, а также позволит оптимизировать составление заданий на проектирование отдельных машин и систем машин для конкретных природно-производственных условий эксплуатации.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>

Литература

1. Тетеревлева Е.В., Гринько О.И., Григорьева О.И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 374-377.
2. Чемшикова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 400-403.
3. Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республ. науч.-практической конф. (29 янв. 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 7-9.
4. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 323-326.
5. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // International Journal of Environmental Studies. 2023. V. 80, № 4. P. 1055-1064.
6. Куницкая О.А., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В., Новиков М.С., Каляшов В.А. Промежуточные итоги проекта «теоретическое и экспериментальное обоснование систем машин для лесозаготовок и лесовосстановления на склонах в условиях криолитозоны» // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (2 мая 2023 г.). Петрозаводск, 2023. С. 108-110.
7. Григорьева О.И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы III Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (30 мая 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 56-58.
8. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы науч.-технической конф. (13-15 апр. 2016 г.). СПб., 2016. С. 112-114.
9. Григорьева О.И. Повышение эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 65-летию высш. лесного образования в Республике Карелия (24 мая 2016 г.). Петрозаводск, 2016. С. 70-73.
10. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (19 апр. 2018 г.). Тюмень, 2018. С. 79-83.
11. Гринько О.И., Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Инновационный способ остановки верховых лесных пожаров // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 15-18.
12. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. ст. Всерос. науч.-практической конф. (10 марта 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 66-69.
13. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: новые концепции и технологии: материалы Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (23 окт. 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 45-49.
14. Григорьева О.И., Гринько О.И., Николаева Ф.В. Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колесных форвардеров // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы междунар. науч.-технической конф. (15 апр. 2021 г.). Тюмень, 2021. С. 55-58.
15. Трушевский П.В., Куницкая О.А. Способы сбора порубочных остатков для производства биотоплива // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24-28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 89-93.
16. Трушевский П.В., Куницкая О.А., Николаев В.В. Конструктивные решения мобильных установок для производства биотоплива из измельченной древесины //

- Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: материалы Междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и студентов (29 сент. 2023 г.). Воронеж, 2023. С. 183-188.
17. Михайлова Л.М., Куницкая О.А., Мотовилов А.И. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъемных лесозаготовок и лесохозяйственных работ // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС (Я) М.Е. Николаева (17 нояб. 2022 г.). Якутск, 2022. С. 735-742.
 18. Каляшов В.А., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Современные технологии и системы машин для заготовки древесины на склонах // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв. - 12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 46-49.
 19. Куницкая О.А., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Григорьева О.И. Основные правила безопасной эксплуатации универсальных лесозаготовительных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 6. С. 33-42.
 20. Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
 21. 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. V. 18, № 4. P. 1-16.
 22. Егорин А.А., Петросян С.С., Андронов А.В., Хитров Е.Г., Степанищева М.В. Анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 127-131.
 23. An introduction to machine learning with scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/tutorial/basic/tutorial.html> (дата обращения: 01.03.2024).
 24. Сухов А.С., Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Друзьянова В.П., Тепшов А.В., Задраускайте Н.О. Исследование моделей-классификаторов лесных машин на основе логистической регрессии // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2023. № 246. С. 297-310.
 25. Mehryar Mohri, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar. Foundations of Machine Learning. The MIT Press, 2012.
- nichnom regione: materialy respubl. nauch.-prakticheskoy konf. (29 yanv. 2015 g.). Petrozavodsk, 2015. P. 7-9.
4. Rudov S.E., Kunickaya O.A. Theoretical studies of the ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of the cryolithozone forests // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 323-326.
 5. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // International Journal of Environmental Studies. 2023. V. 80, № 4. P. 1055-1064.
 6. Kunickaya O.A., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V., Novikov M.S., Kalyashov V.A. Interim results of the project "theoretical and experimental substantiation of machine systems for logging and reforestation on slopes in cryolithozone conditions" // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Devyatoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (2 maya 2023 g.). Petrozavodsk, 2023. P. 108-110.
 7. Grigor'eva O.I. Promising directions for improving the efficiency of logging of forest care // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy III Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (30 maya 2017 g.). Petrozavodsk, 2017. P. 56-58.
 8. Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. Promising technology for logging forest care // Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauch.-tekhnicheskoy konf. (13-15 apr. 2016 g.). SPb., 2016. P. 112-114.
 9. Grigor'eva O.I. Improving the efficiency of logging of forest care // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vtoroj Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 65-letiyu vyssh. lesnogo obrazovaniya v Respublike Kareliya (24 maya 2016 g.). Petrozavodsk, 2016. P. 70-73.
 10. Grigor'eva O.I. Efficiency of transport and technological systems for forestry // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19 apr. 2018 g.). Tyumen', 2018. P. 79-83.
 11. Grin'ko O.I., Shapiro V.Ya., Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F., Stepanova D.I., Grigor'eva A.I. An innovative way to stop upper forest fires // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2020. № 56. P. 15-18.
 12. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B., Grin'ko O.I. Prospects of import substitution in the production of household and forest fire fighting machines in Russia // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. st. Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (10 marta 2020 g.). Krasnoyarsk, 2020. P. 66-69.
 13. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B., Grin'ko O.I., Vojnash S.A. The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires // Mashinostroenie: novye koncepcii i tekhnologii: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh (23 okt. 2020 g.). Krasnoyarsk, 2020. P. 45-49.
 14. Grigor'eva O.I., Grin'ko O.I., Nikolaeva F.V. Forest fire transport and technological complexes based on wheeled forwarders // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (15 apr. 2021 g.). Tyumen', 2021. P. 55-58.
 15. Trushevskij P.V., Kunickaya O.A. Methods of collecting felling residues for biofuel production // Current problems of forestry and wood processing // Aktual'nye problemy lesnogo

References

1. Teterleva E.V., Grin'ko O.I., Grigor'eva O.I. Transport and technological machines for extinguishing forest fires based on wheeled vehicles // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 374-377.
2. Chemshikova Yu.M., Davtyan A.B., Grigor'eva O.I. Transport and technological systems for reconnaissance based on tracked all-terrain vehicles: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 400-403.
3. Kalistratov A.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. On the importance of research on the environmental efficiency of the skidding process // Nauka, obrazovanie, innovacii v prigra-

- hozyajstva i derevopererabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 89-93.
16. Trushevskij P.V., Kunickaya O.A., Nikolaev V.V. Constructive solutions for mobile installations for the production of biofuels from crushed wood // Perspektivnye resursos-beregayushchie tekhnologii razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i studentov (29 sent. 2023 g.). Voronezh, 2023. P. 183-188.
 17. Mihajlova L.M., Kunickaya O.A., Motovilov A.I. Prospects of machine systems based on small-scale mechanization for low-volume logging and forestry operations // Strategiya i perspektivy razvitiya agrotekhnologij i lesnogo kompleksa Yakutii do 2050 goda: sb. nauch. st. po materialam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 100-letiyu obrazovaniya Yakutskoj ASSR i 85-letiyu Pervogo prezidenta RS (Ya) M.E. Nikolaeva (17 noyab. 2022 g.). Yakutsk, 2022. P. 735-742.
 18. Kalyashov V.A., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Modern technologies and systems of machines for harvesting wood on slopes // Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 46-49.
 19. Kunickaya O.A., Krivosheev A.A., Shvecov A.S., Grigor'eva O.I. Basic rules for the safe operation of universal logging machines // Safety and labor protection in logging and wood-working industries. 2023. № 6. P. 33-42.
 20. Hitrov E.G. Comprehensive justification of parameters and modes of operation of propellers of forest tires: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p.
 21. Andronov A.V., Petrosyan S.S., Egorin A.A., Il'yushenko D.A., Hitrov E.G. Classification of forwarders using clusterization of data on their operational characteristics // Resources and Technology. 2021. V. 18, № 4. P. 1-16.
 22. Egorin A.A., Petrosyan S.S., Andronov A.V., Hitrov E.G., Stepanishcheva M.V. Analysis of operational characteristics of modern harvesters // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 4 (52). P. 127-131.
 23. An introduction to machine learning with scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/tutorial/basic/tutorial.html> (data obrashcheniya: 01.03.2024).
 24. Suhov A.S., Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Druz'yanova V.P., Teppoev A.V., Zadrauskajte N.O. The study of models classifiers of forest machines based on logistic regression // Izvestia SPbLTA. 2023. № 246. P. 297-310.
 25. Mehryar Mohri, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar. Foundations of Machine Learning. The MIT Press, 2012.