

Тестирование классификации харвестеров на основе модельных данных и метода опорных векторов

С.С. Петросян^{1а}, А.Ю. Жук^{2б}, М.А. Кокшаров^{2с}, И.С. Должиков^{3д}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5У, г. Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2 Красноармейская, 4, г. Санкт-Петербург, Россия

^а surik1622@gmail.com, ^б ftslk@brstu.ru, ^с maksont_koksharov@mail.ru, ^д idolzhikov@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>,

Статья поступила 15.06/4.2026, принята 15.05.2026

Цель статьи – проанализировать эксплуатационные характеристики колёсных харвестеров, обосновать число классов в кластерном подходе к группировке моделей машин по принципу схожести эксплуатационных характеристик и провести тестирование предлагаемой разметки с использованием модельных данных, распределённых по нормальному распределению с параметрами, выявленными на этапе группировки моделей машин. Представлена и протестирована классификация колёсных харвестеров, включающая в себя три класса (лёгкие, средние, тяжёлые), которая позволяет оптимизировать выбор техники под конкретные природно-производственные условия её применения. Данная классификация также позволяет оптимизировать составление заданий на проектирование отдельных машин и систем машин, для конкретных природно-производственных условий эксплуатации. Сформулированная классификация позволяет уточнить диапазоны изменения параметров машин при реализации математических моделей, прогнозирующих показатели технологической и экологической эффективности техники. Например, для разработки среднощадящих технологических процессов сортиментной технологии заготовки древесины рекомендуется лёгкая техника. В предложенной классификации масса лёгких харвестеров составляет до 13 т при мощности двигателя в пределах 130 кВт. Вылет манипулятора составляет до 8 м. Определена верхняя граница варьирования эксплуатационных характеристик для сверхлёгкого класса колёсных харвестеров, разработке и внедрению которых следует уделить внимание в дальнейшем. Такие машины, согласно полученным результатам, весят в пределах 7,3 т, мощность двигателя составляет ориентировочно до 90 кВт; вылет манипулятора до 5,4 м.

Ключевые слова: кластеризация; масса машины; мощность двигателя; вылет манипулятора.

Testing the classification of harvesters based on model data and the support vector machine method

S.S. Petrosyan^{1а}, A.Yu. Zhuk^{2б}, M.A. Koksharov^{2с}, I.S. Dolzhikov^{3д}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

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

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St Petersburg, Russia

^а surik1622@gmail.com, ^б ftslk@brstu.ru, ^с maksont_koksharov@mail.ru, ^д idolzhikov@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>,

^с <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>,

Received 15.04.2026, accepted 15.05.2026

The aim of the article is to analyze the operational characteristics of wheeled harvesters, justify the number of classes in a cluster approach to grouping machine models based on the similarity of their operational characteristics, and test the proposed labeling using model data distributed according to a normal distribution with parameters identified at the stage of grouping machine models. A classification of wheeled harvesters, comprising three classes (light, medium, and heavy), is presented and tested. This classification allows for the optimization of equipment selection for specific environmental and production conditions. This classification also facilitates the optimization of design specifications for individual machines and machine systems for specific environmental and production conditions. The developed classification allows for the refinement of the ranges of machine parameter variations when implementing mathematical models that predict the technological and environmental performance of equipment. For example, light equipment is recommended for the development of environmentally friendly processes for cut-to-length timber harvesting. In the proposed classification, the mass of light harvesters is up to 13 tons with an engine power of 130 kW. The crane reach is up to 8 m. The upper limit of performance variability has been determined for extra-light wheeled harvesters, the development and implementation of which should be given further consideration. According to the results obtained, such machines weigh approximately 7.3 tons, have an engine power of approximately 90 kW, and have a crane reach of up to 5.4 tons.

Keywords: clustering; machine weight; manipulator reach; engine output.

Введение. Ранее были представлены классификации лесной техники, основанные на использовании методов интеллектуального анализа данных [1–3]. Идея состоит в разделении моделей машин на кластеры по принципу группировки в каждый из них моделей (объектов) со схожими эксплуатационными характеристиками, причём исходными данными для разработки подобных классификаций являются значения эксплуатационных характеристик машин, а также число кластеров, которое, в общем случае, варьируется [1–3]. Подобный подход считается более «гибким» по сравнению с классической разметкой границ варьирования параметров объектов и дальнейшим отнесением модели к тому или иному классу: сами границы определяются не экспертным путём, а на основе анализа параметров техники [1–3]. Использование разработок позволяет упростить выработку рекомендаций по организации технологических процессов средоолагодающего лесопользования и согласуется с современной концепцией природоподобных лесных технологий [4–10]. При этом сравнительно меньше внимания уделено анализу и классификации харвестерных машин. Кроме того, для дальнейшего развития кластерного подхода следует апробировать методику тестирования устойчивости получаемых классификаций, т. е. проверить, насколько адекватно квалифицируются образцы техники, характеристики которых не использовались при разметке классов-кластеров.

Цель нашей работы – проанализировать эксплуатационные характеристики колёсных харвестеров, обосновать число классов в кластерном подходе к группировке моделей машин по принципу схожести эксплуатационных характеристик и провести тестирование предлагаемой разметки с использованием модельных данных, распределённых по нормальному распределению с параметрами, выявленными на этапе группировки моделей машин.

Материалы и методы исследования. Данные для анализа получены из баз [11–13] и актуализированы путём направленного сбора сведений из открытых источников, главным образом – веб-сайтов производителей лесной техники; использованные данные актуальны на 2026 г. Использованы сведения о 38 моделях колёсных харвестеров. Учтены такие характеристики, как масса машины с навесным оборудованием M , длины, ширина и высота кузова, L , W , H соответственно, колёсная база WB , дорожный просвет GC , максимальная скорость V , мощность двигателя EO и вылет манипулятора MR .

Результаты исследования. Разметку кластеров рекомендуется производить в пространстве главных компонент, определяемых ортогональным преобразованием:

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

где X – исходная матрица признаков объектов, R – матрица поворота, составленная из d правых сингулярных векторов матрицы ковариации эксплуатационных характеристик, K – матрица главных компонент, n – число анализируемых моделей машин, m – число характеристик, учтённых при анализе, d – число главных компонент.

В случаях, когда для анализа целесообразно снизить размерность признакового пространства, рациональное число главных компонент d при значительном m возможно определить, проанализировав спектр матрицы ковариации признаков [3]. Для рассматриваемого случая основные результаты анализа спектра приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты анализа спектра матрицы ковариации значений эксплуатационных характеристик харвестеров

№	σ	EV	EVR
1	15,6504	6,6198	0,7162
2	6,0733	0,9969	0,1079
3	5,4266	0,7959	0,0861
4	3,7225	0,3745	0,0405
5	2,6780	0,1938	0,0210
6	2,0430	0,1128	0,0122
7	1,6003	0,0692	0,0075
8	1,4880	0,0598	0,0065
9	0,8696	0,0204	0,0022

В табл. 1 обозначено: σ – собственное число матрицы ковариации, EV – дисперсия признаков, объяснённая главной компонентой с соответствующим номером, EVR – доля дисперсии признаков, объяснённая соответствующей главной компонентой.

Результаты, приведённые в табл. 1, проиллюстрируем на рис. 1.

На рис. 1 оценки доли дисперсии признаков, сохранённой при преобразовании (1), рассчитаны по формуле [1–3]:

$$CVR = \frac{\sum_{j=1}^d \sigma_j}{\sum_j \sigma_j} \quad (2)$$

Судя по спектру матрицы ковариации эксплуатационных характеристик, число главных компонент, достаточное для сохранения 95 % вариации признаков, составляет $d = 4$.

Решим задачу подразделения моделей техники на кластеры. Для этого при предполагаемом значении числа кластеров k требуется подобрать разметку s объектов у таким образом, чтобы минимизировать суммарное значение расстояний от объектов до центров кластеров:

$$s = \arg \min_s \sum_{j=1}^k \sum_{y \in s_j} \|y - c_j\|_2^2, \quad (3)$$

где c – векторы координат центров кластеров (подбираются путём перебора), x – векторы координат объектов (в решаемой задаче – в пространстве главных компонент), s – векторы разметки (координаты представляют собой индикаторы принадлежности объекта к j -ому кластеру), $s = \{s_1, \dots, s_k\}$.

Для обоснования числа k рассмотрим две следующие метрики, классические для кластерного анализа. Первая из них представляет собой сумму расстояний I от объектов до центров кластеров (метрика I , Inertia) [1–3]:

$$I = \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_i\|_2^2 \quad (4)$$

а вторая – метрика силуэта (S , Silhouette Score), рассчитывается по формуле [1–3]:

$$S = \frac{(b - a)}{\max(a; b)}, \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_i\|_2^2,$$

$$b = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_{j \neq i}\|_2^2$$

Значения I , S приведены в табл. 2 и на рис. 2.

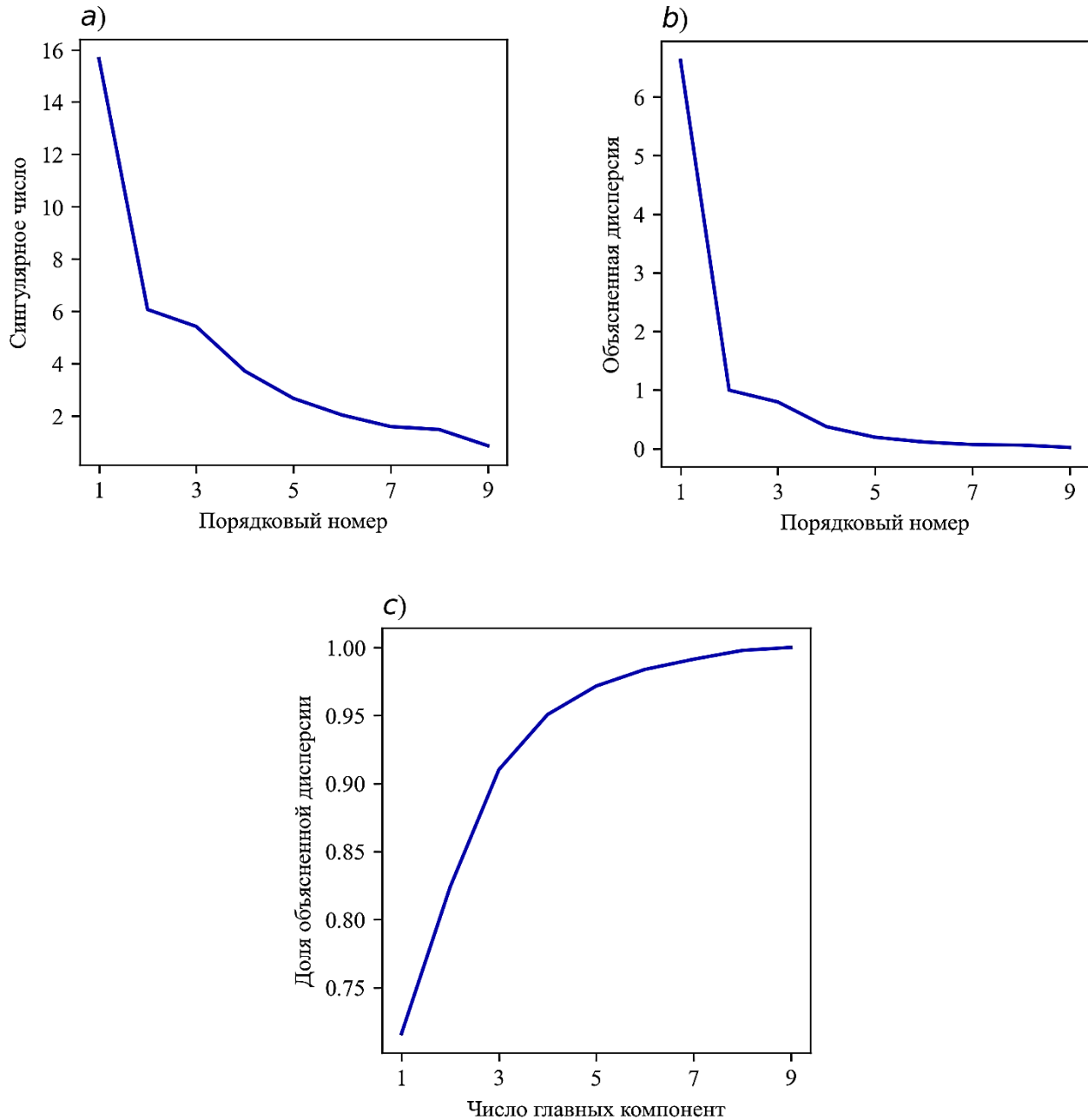


Рис. 1. Результаты анализа спектра матрицы ковариации эксплуатационных характеристик харвестеров: а – сингулярные числа, b – дисперсия, объяснённая главной компонентой, c – доля дисперсии, объяснённая суммой главных компонент

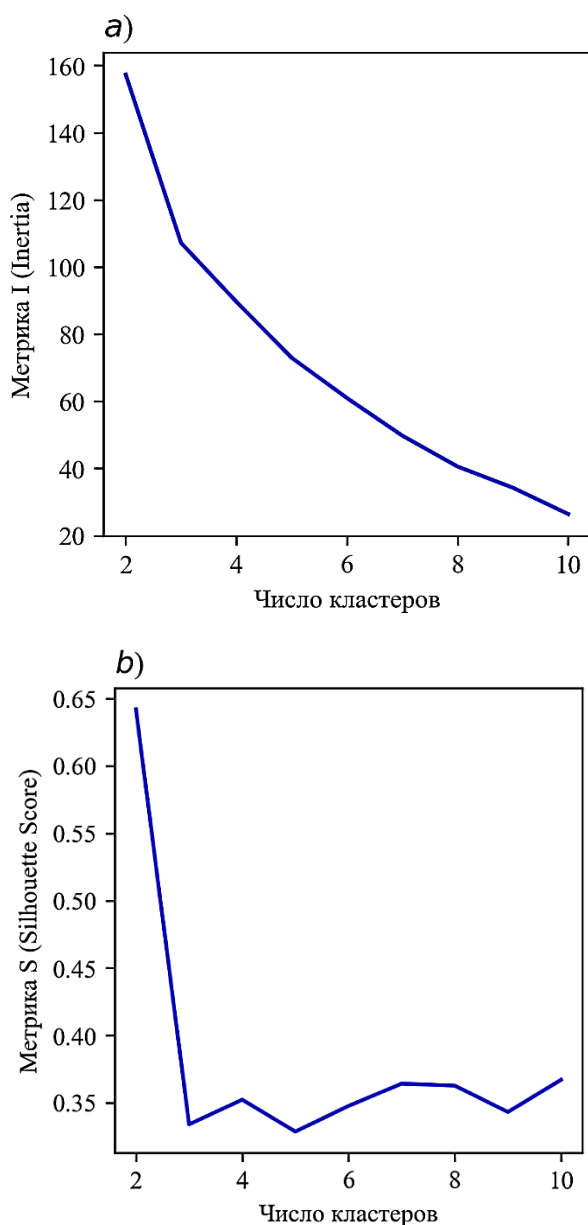


Рис. 2. Метрики кластерной разметки: а) метрика инерции, б) метрика силуэта

Таблица 2. Метрики группировки моделей по кластерам

k	2	3	4	5	6	7	8
I	157,3	107,2	89,7	73,0	61,0	49,8	40,6
S	0,64	0,33	0,35	0,33	0,35	0,36	0,36

По табл. 2 и графикам на рис. 2 можем заметить, что при числе $k \geq 3$ метрика I уменьшается линейно, при этом динамика метрики силуэта S показывает, что оценки S при дальнейшем увеличении числа кластеров близки. По этим причинам целесообразно предположить число кластеров $k = 3$. Полученная разметка моделей техники в проекциях на две главные компоненты проиллюстрирована на рис. 3.

На рис. 3 для кластеров использованы условные обозначения по мере увеличения среднего значения массы машин в них ("S" – легкий класс, "M" – средний класс массы, "L" – тяжёлые машины).

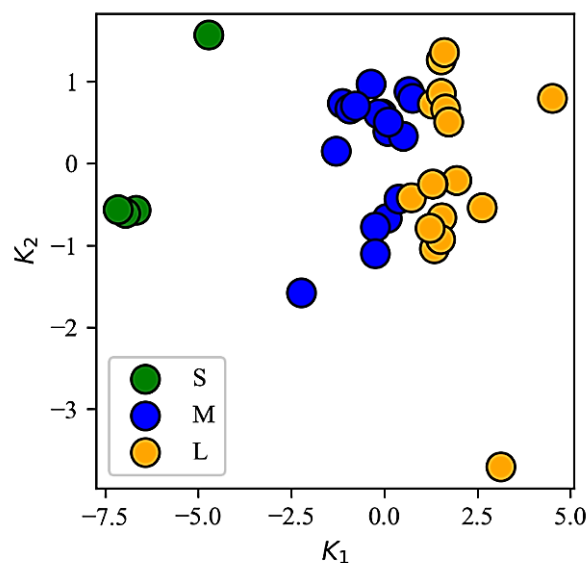


Рис. 3. Разметка объектов по кластерам (проекция на 2 главные компоненты)

По полученной разметке вычислим моменты нормального распределения эксплуатационных характеристик харвестеров внутри кластеров (табл. 3).

Таблица 3. Статистики признаков объектов при подразделении на 3 кластера

Класс	S		M		L	
Стат.	μ	σ	μ	σ	μ	σ
M	8100	455	16871	2436	23033	3184
EO	106	7	157	13	206	14
MR	6,0	0,7	9,7	0,9	9,6	1,2
L	4150	442	7199	624	8282	664
H	2452	556	3720	174	3887	266
W	1666	258	2663	140	2880	200
WB	2462	215	3775	247	4735	599
GC	321	43	629	43	667	72
V	17,9	4,1	21,9	4,0	23,3	4,3

В таблице обозначено: μ – среднее арифметическое значение, S – выборочное стандартное отклонение

Для тестирования предлагаемой разметки рассмотрим модель – классификатор основ метода опорных векторов (SVM, Support Vector Machine). Для каждого из классов составляется отдельная модель бинарной классификации с линейным ядром:

$$g(x, w, w_0) = \text{signum}((w, x) - w_0) \quad (6)$$

где w_0 – смещение модели, w – веса модели классификатора, которые находятся из решения задачи безусловной минимизации:

$$L = \frac{1}{2} \|w\|_2^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i)_+ \rightarrow \min_{w, w_0} \quad (7)$$

где слагаемое штрафа:

$$\xi_i = 1 - y_i((w, x_i) - w_0), \quad (8)$$

где $y_i \in \{-1; +1\}$, а срез «+»:

$$(\xi)_+ = \begin{cases} \xi, & \xi \geq 0 \\ 0, & \xi < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Для каждого из k классов строится отдельная модель, после чего принадлежность конкретного образца машины к тому или иному классу определяется функцией SoftMax:

$$\text{SoftMax} = \max_j \frac{\exp(y_j g_j(x, w, w_0))}{\sum_{j=1}^k \exp(y_j g_j(x, w, w_0))} \quad (10)$$

Теперь воспользуемся моделью-классификатором SVM, подготовленной на исходной разметке техники по кластерам, для разметки модельных данных с эксплуатационными характеристиками, распределёнными в соответствии с нормальным законом с моментами, указанными в табл. 3. Метки тестовой разметки также соответствуют кластерам по табл. 3. Результаты тестирования модели-классификатора указаны в табл. 4.

Таблица 4. Оценка модели-классификатора техники на основе метода опорных векторов на модельной выборке данных

Класс	P	R	F_1
S	0,9691	0,9400	0,9543
M	0,8173	0,8500	0,8333
L	0,8056	0,8700	0,8365
Взвешенное значение	0,8980	0,8925	0,8943

В таблице обозначено: P , R – метрики полноты и точности классификации, F_1 – их гармоническое среднее

Результаты тестирования приведены на рис. 4.

Как показывают расчёты, разметка, полученная при помощи модели-классификатора SVM, подготовленной на основе результатов кластеризации, согласуется с разметкой модельных данных с распределением признаков по нормальному закону с моментами, также определёнными на основе разметки кластеров.

Тестовая разметка	L	91	9	0
	M	6	94	0
	S	0	0	100
		L	M	S
		Прогноз модели		

Рис. 4. Сравнение классов харвестеров по прогнозу модели-классификатора на основе метода опорных векторов и разметки модельных данных

Дополнительно разметка объектов и модельных данных по кластерам проиллюстрирована на рис. 5. Результаты доказывают, что предлагаемая разметка устойчива при добавлении новых данных, и результаты её тестирования следует признать удовлетворительными. Таким образом, предлагаемое число классов колёсных харвестеров 3 можем считать целесообразным.

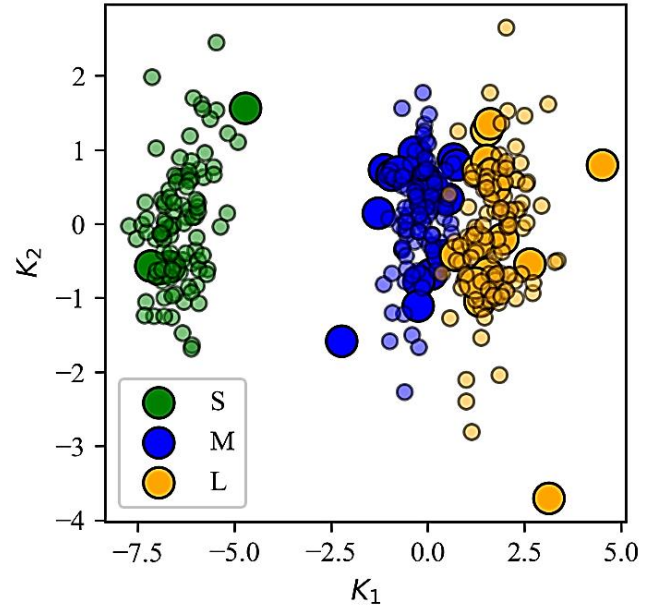


Рис. 5. Разметка объектов и модельных данных по кластерам (проекция на 2 главные компоненты)

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

В табл. 5 границы варьирования характеристик в классах получены пропорционально стандартным отклонениям признаков в соседних кластерах:

$$\begin{aligned} \max x_{j,k} &= \mu_{j,k} + (\mu_{j,k+1} - \mu_{j,k}) \frac{S_{j,k}}{S_{j,k+1}} = \\ &= \min x_{j,k+1}, \end{aligned} \quad (11)$$

для лёгких "S" машин соответственно нижняя граница определены по формуле:

$$\min x_{j,0} = \max\{\min x_{j,0}; \mu_{j,0} - 2S_{j,3}\} \quad (12)$$

Таблица 5. Предлагаемая классификация колёсных харвестеров

Класс	$\underline{S}$	$\bar{S}$	$\bar{M}$	$\bar{L}$
M	7310	12824	20265	29230
EO	90	132	181	242
MR	5,4	7,9	9,8	11,9
L	3429	5694	7771	9555
H	1264	3062	3825	4417
W	1173	2185	2774	3236
WB	2072	3169	4243	5817
GC	337	478	651	803
V	10	20	23	31

В табл. 5 верхней чертой указаны верхние границы варьирования значения эксплуатационной характеристики в классе, нижней чертой – нижняя граница для лёгкого класса "S".

Для разработки средооадающих технологических процессов сортиментной технологии заготовки древесины рекомендуется лёгкая техника [14–20]. В предложенной классификации масса лёгких харвестеров составляет до 13 т при мощности двигателя в пределах 130 кВт. Вылет манипулятора составляет до 8 м.

Нижняя граница лёгкого класса "S" определяет верхнюю границу для сверхлёгкого класса харвестерных машин, разработке которых следует уделить внимание в дальнейшем. Такие машины, согласно полученным результатам, весят в пределах 7,3 т, мощность двигателя составляет ориентировочно до 90 кВт; вылет манипулятора до 5,4 т.

Заключение. В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Представлена и протестирована классификация колесных харвестеров, включающая в себя три класса (легкие, средние, тяжелые) (табл. 5), которая позволяет

оптимизировать выбор техники под конкретные природно-производственные условия ее применения.

2. Данная классификация также позволяет оптимизировать составление заданий на проектирование отдельных машин, и систем машин, для конкретных природно-производственных условий эксплуатации.

3. Сформулированная классификация позволяет уточнить диапазоны изменения параметров машин при реализации математических моделей, прогнозирующих показатели технологической и экологической эффективности техники. Например, для разработки средооадающих технологических процессов сортиментной технологии заготовки древесины рекомендуется легкая техника. В предложенной классификации масса лёгких харвестеров составляет до 13 т при мощности двигателя в пределах 130 кВт. Вылет манипулятора составляет до 8 м.

4. Определена верхняя граница варьирования эксплуатационных характеристик для сверхлёгкого класса колесных харвестеров, разработке и внедрению которых следует уделить внимание в дальнейшем. Такие машины, согласно полученным результатам, весят в пределах 7,3 т, мощность двигателя составляет ориентировочно до 90 кВт; вылет манипулятора до 5,4 т.

Литература

- 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.
- 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.
- Федосеева М.А., Киселев П.С., Наганов А.С., Петросян С.С., Щукин А.В., Хитров Е.Г. Классификация четырехосных форвардеров на основе кластеризации данных в пространстве главных компонент // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. № 243. С. 240–252.
- Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В. Природоподобные лесные технологии как фактор снижения техногенных угроз в условиях интенсивного ведения лесного хозяйства // *Системы. Методы. Технологии*. 2024. № 4 (64). С. 144–150.
- Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021. № 1 (379). С. 138–149.
- Герц Э.Ф., Уразова А.Ф., Теринов Н.Н. Риски повреждения деревьев при перемещении лесозаготовительных машин под пологом древостоя // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2024. № 65. С. 167–169.
- Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Залесов С.В., Терехов Г.Г., Толкач О.В. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом // *Resources and Technology*. 2023. Т. 20. № 4. С. 1–27.
- Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests // *Journal of Forestry Research*. 2022. Т. 33. № 4. С. 1145–1156.
- Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East // *Forest Science and Technology*. 2022. Т. 18. № 4. С. 190–200.
- Рэго Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2025. № 2 (404). С. 38–50.
- Григорьев И.В., Григорьев М.Ф., Куницкая О.А., Давтян А.Б., Григорьева О.И., Григорьева А.И. Харвестерные головки для рубок ухода за лесом, заготовки энергетической древесины, рубок спелых и перестойных насаждений // *Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020622610*, 11.12.2020. Заявка № 2020622531 от 07.12.2020.
- Хахина А.М., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Григорьева А.И. Тенденции изменения характеристик колёсных лесных машин // *Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020622223*, 11.11.2020. Заявка № 2020622122 от 30.10.2020.
- Хитров Е.Г., Андронов А.В., Ильюшенко Д.А. Характеристики современных лесозаготовительных машин (v2.0) // *Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020620805*, 19.05.2020. Заявка № 2020620541 от 26.03.2020.
- Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Комплексная оценка показателей взаимодействия движителей машин с лесными грунтами на базе методов теории движения транспорта в условиях бездорожья // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18. № 1. С. 1–52.
- Grigorev I., Kunitskaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Т. 19. № 2. С. 439–447.
- Grigorev I., Kunitskaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // *Journal of Terramechanics*. 2022. Т. 101. С. 1–9.

17. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // *Forests*. 2021. T. 12. № 12.
18. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022. T. 31. № 5. C. 4107–4115.
19. Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024. T. 11. № 1. C. 133–140.
20. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. T. 18. № 3. C. 95–102.
- timizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East // *Forest Science and Technology*. 2022. Vol. 18. No. 4. pp. 190–200.
10. Rego G.E., Grigorieva O.I., Grigorieva I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. Mathematical model for selecting trees in a homogeneous stand during thinning // *News of higher educational institutions. Forestry journal*. 2025. No. 2 (404). pp. 38–50.
11. Grigoriev I.V., Grigoriev M.F., Kunitskaya O.A., Davtyan A.B., Grigorieva O.I., Grigorieva A.I. Harvester heads for thinning, energy wood harvesting, and felling mature and overmature stands // Database registration certificate RU 2020622610, 11.12.2020. Application No. 2020622531 dated 07.12.2020.
12. Khakhina A.M., Grigoriev I.V., Grigoriev M.F., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Grigorieva A.I. Trends in changing characteristics of wheeled forestry machines // Database registration certificate RU 2020622223, 11.11.2020. Application No. 2020622122 dated October 30, 2020.
13. Khitrov E.G., Andronov A.V., Ilyushenko D.A. Characteristics of modern logging machines (v2.0) // Certificate of database registration RU 2020620805, May 19, 2020. Application No. 2020620541 dated March 26, 2020.
14. Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigoriev G.V. Comprehensive assessment of the interaction indicators of machine propellers with forest soils based on the methods of the theory of transport movement in off-road conditions // *Resources and Technology*. 2021. Vol. 18. No. 1. pp. 1–52.
15. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. T. 19. No. 2. P. 439–447.
16. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // *Journal of Terramechanics*. 2022. T. 101. P. 1–9.
17. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // *Forests*. 2021. Vol. 12. No. 12.
18. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022. T. 31. No. 5. P. 4107–4115.
19. Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024. Vol. 11. No. 1. Pp. 133–140.
20. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. T. 18. № 3. Pp. 95–102.

References

1. 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.
2. Sukhov A.S., Khitrov E.G., Grigoriev I.V., Druzyanova V.P., Teppoev A.V., Zadrauskaite N.O. Study of classifier models of forestry machines based on logistic regression // *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2023. No. 246. pp. 297–310.
3. 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. pp. 240–252.
4. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Terinov N.N., Urazova A.F., Efimov Yu.V. Nature-like forest technologies as a factor in reducing man-made threats in conditions of intensive forestry // *Systems. Methods. Technologies*. 2024. No. 4 (64). pp. 144–150.
5. Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Pobedinsky V.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Improving the efficiency of multifunctional machines for intensive forestry // *News of higher educational institutions. Forestry journal*. 2021. No. 1 (379). Pp. 138–149.
6. Gerts E.F., Urazova A.F., Terinov N.N. Risks of tree damage when moving logging machines under the canopy // *Actual problems of the forest complex*. 2024. No. 65. Pp. 167–169.
7. Terinov N.N., Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Zalesov S.V., Terekhov G.G., Tolkach O.V. Technological schemes for the use of mini-tractors in forest thinning // *Resources and Technology*. 2023. T. 20. No. 4. P. 1–27.
8. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests // *Journal of Forestry Research*. 2022. T. 33. No. 4. P. 1145–1156.
9. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by op-