

Разработка классификации гусеничных тракторов для лесного и сельского хозяйства

И.С. Должиков^{1а}, П.А. Курочкин^{2б}, Е.Г. Хитров^{3с}, В.М. Дьяченко^{4д},
Л.М. Михайлова^{5е}, И.В. Григорьев^{5ф}, Д.В. Болотин^{6г}

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, 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 Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

^а idolzhikov222@mail.ru, ^б pavel.a.kurochkin@yandex.ru, ^с yegorkhitrov@gmail.com, ^д
Volodya.Dyachenko1986@mail.ru,

^е lyutsiya.losotova@mail.ru, ^ф silver73@inbox.ru, ^г bolotin97@internet.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^б <https://orcid.org/0009-0006-8900-1975>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>,

^д <https://orcid.org/0009-0003-0510-7579>, ^е <https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^г <https://orcid.org/0009-0008-4015-9661>

Статья поступила 09.09.2024, принята 25.09.2024

Гусеничные тракторы, используемые в лесозаготовительном производстве, сельском и лесном хозяйстве, отличаются большой вариативностью конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик. Целью данного исследования является обоснование классификации гусеничных тракторов, предназначенных для лесного и сельского хозяйства, на основе результатов анализа данных, полученных с использованием алгоритмов машинного обучения. Для проведения исследования использованы материалы, полученные из открытых источников в сети Интернет (данные производителей гусеничной техники Bobcat, Case, Caterpillar, JCB, Komatsu, Kubota, Takeuchi, Volvo, Wacker Neuson, Yanmar; всего 104 модели гусеничных тракторов). Рассмотрены сведения о массе, мощности двигателя, тяговом усилии, длине, ширине, высоте корпуса машины, длине и ширине проекции гусеницы на грунт, дорожном просвете и максимальной скорости. Классификация предложена на основе разметки объектов (моделей тракторов), полученной при помощи метода кластеризации данных k-средних (k-means). Кластеризация выполнена по признакам (эксплуатационным характеристикам), отображенным в пространство главных компонент. Вычисления проведены в среде Google Colaboratory, программа для расчетов подготовлена на языке Python. В результате выполненного анализа данных предложена классификация гусеничных тракторов, предназначенных для работы в лесозаготовительном производстве, лесном и сельском хозяйстве, в рамках которой машины подразделяются на 4 класса по эксплуатационным характеристикам (сверхлегкие, легкие, средние и тяжелые машины).

Ключевые слова: лесное машиностроение; гусеничные лесные машины; гусеничные сельскохозяйственные машины; обучение без учителя; кластеризация данных.

Development of a classification of tracked tractors for forestry and agriculture

I.S. Dolzhikov^{1а}, P.A. Kurochkin^{2б}, E.G. Khitrov^{3с}, V.M. Dyachenko^{4д},
L.M. Mikhailova^{5е}, I.V. Grigoriev^{5ф}, D.V. Bolotin^{6г}

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; Bld. 1, 65, 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 St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

^a idolzhikov222@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 bolotin97@internet.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/0009-0008-4015-9661>

Received 09.09.2024, accepted 25.09.2024

Tracked tractors used in logging, agriculture and forestry are characterized by great variability in design parameters and operational characteristics. The purpose of this study is to substantiate the classification of tracked tractors intended for forestry and agriculture, based on the results of data analysis obtained using machine learning algorithms. To conduct the study, materials obtained from open sources on the Internet were used (data from manufacturers of tracked vehicles Bobcat, Case, Caterpillar, JCB, Komatsu, Kubota, Takeuchi, Volvo, Wacker Neuson, Yanmar; a total of 104 models of tracked tractors). Information on the mass, engine power, traction, length, width, height of the machine body, length and width of the track projection on the ground, ground clearance and maximum speed are considered. The classification is proposed based on the markup of objects (tractor models) obtained using the k-means data clustering method. Clustering is performed according to the features (operational characteristics) mapped into the space of the main components. The calculations are performed in the Google Colaboratory environment, the calculation program is prepared in Python. As a result of the performed data analysis, a classification of tracked tractors designed for work in logging, forestry and agriculture is proposed, within which the machines are divided into 4 classes according to performance characteristics (ultralight, light, medium and heavy machines).

Keywords: forestry engineering; tracked forestry machines; tracked agricultural machines; unsupervised learning; data clustering.

Введение. Несмотря на доминирование в настоящее время на лесозаготовительных и сельскохозяйственных предприятиях России импортных колесных лесных машин, особенно на лесосечных работах, гусеничные машины по-прежнему применяются достаточно широко [1–5]. Их преимуществом, прежде всего, является большее тяговое усилие (при прочих равных условиях), а также меньшее давление на опорную поверхность и, соответственно, меньшее уплотнение почвы и колесобразование [6–10].

Основной проблемой гусеничных машин является невозможность их самостоятельного перебазирования с объекта на объект (с лесосеки на лесосеку, с вырубki на вырубку) по дорогам общего пользования, а также меньшие эксплуатационные скорости, но в условиях лесосек и вырубok последнее обстоятельство обычно не сильно влияет на производительность [11–15].

В условиях почвогрунтов со слабой несущей способностью, глубокого снега гусеничные машины показывают значительно лучшую эксплуатационную и экологическую эффективность, что дает основания рассчитывать на их дальнейшее достаточно широкое применение в лесозаготовительном производстве, лесном и сельском хозяйстве [16–20].

Для упрощения разработки и применения рекомендаций по организации технологических процессов в области лесозаготовительного производства, лесного и сельского хозяйства используются различные классификации техники (машин и оборудования) [21]. Как правило, в классификациях используются такие характеристики машин, как масса, мощность двигателя, тяговое усилие, грузоподъемность, энергонасыщенность, тяговый класс (для машин, выполняющих транспортные и технологические операции) [22; 23]. При этом диапазоны изменения значений характеристик (признаков) в различных источниках могут отличаться [22; 23]. Зачастую диапазоны получают путем деления размаха признака на равные интервалы, число которых принимается с учетом предыдущего опыта [22; 23]. Ввиду большого числа признаков и их значительной

вариативности можно утверждать, что для экспертов разработка классификаций является нетривиальной трудоемкой задачей.

Ранее для разработки классификаций отдельных типов лесных машин результативно использованы методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения [24]. Доказано, что использование алгоритмов машинного обучения позволяет дополнительно обосновать экспертные оценки объективными числовыми метриками [24]. Для гусеничных тракторов и вездеходных машин, предназначенных для лесозаготовительного производства, лесного и сельского хозяйства, такой подход до настоящего времени не использовался, несмотря на практическую потребность в уточнении результатов, полученных ранее.

Целью данной работы является обоснование классификации гусеничных тракторов, предназначенных для лесозаготовительного производства, лесного и сельского хозяйства, на основе результатов анализа данных, полученных с использованием алгоритмов машинного обучения.

Материалы и методы исследования. Для проведения исследования использованы материалы, полученные из открытых источников в сети Интернет (данные производителей гусеничной техники *Bobcat, Case, Caterpillar, JCB, Komatsu, Kubota, Takeuchi, Volvo, Wacker Neuson, Yanmar*; всего 104 модели гусеничных тракторов). Рассмотрены сведения о массе M , кг; мощности двигателя N , кВт; тяговом усилии TF , кН; длине L , мм, ширине W , мм, высоте H , мм, корпуса машины; длине TL , см, и ширине TW , см, гусеницы; дорожном просвете GC , мм, и максимальной скорости V , км/ч.

Классификация предложена на основе разметки объектов (моделей тракторов), полученной при помощи метода кластеризации данных k -средних (k -means). Кластеризация выполнена по признакам (эксплуатационным характеристикам), отображенным в пространство главных компонент. Вычисления

проведены в среде *Google Colaboratory*, программа для расчетов подготовлена на языке *Python*.

Результаты исследования. Основные статистические данные по рассмотренным признакам гусеничных тракторов приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов линейной корреляции этих признаков.

Обратим внимание на особенности набора данных: признаки отличаются вариативностью (для ряда из них стандартные отклонения S сопоставимы со средними значениями μ) и представлены в различном масштабе; признаки зачастую тесно коррелируют между собой.

Проблему масштаба данных с учетом их вариативности решим при помощи стандартизации:

$$X^* = (X - \mathcal{M})S^{-1}, \quad (1)$$

где X — матрица с исходными значениями признаков; \mathcal{M} — матрица средних значений; S — диагональная матрица стандартных отклонений признаков:

$$X_{n,m} = \begin{bmatrix} | & & | \\ x_1 & \dots & x_m \\ | & & | \end{bmatrix}, \mathcal{M}_{n,m} = \begin{bmatrix} | & & | \\ \mu_1 & \dots & \mu_m \\ | & & | \end{bmatrix},$$

$$S_{m,m} = \begin{bmatrix} S_1 & & \\ & \ddots & \\ & & S_m \end{bmatrix},$$

n — число объектов; m — число признаков.

В случае удаления коррелирующих признаков из набора данных не представляется возможным оценить долю сохраненной дисперсии и точность приближения исходной матрицы. По этой причине воспользуемся методом главных компонент и проведем анализ в признаковом пространстве, полученном с помощью линейного преобразования:

$$K_{n,d} = X_{n,m}^* R_{m,d}, \quad (2)$$

где матрица поворота R составлена из d штук нормированных правых сингулярных векторов разложения:

$$(X^*)^T X^* = U \Sigma V^T, \quad (3)$$

где Σ — диагональная матрица сингулярных чисел; U , V — соответственно матрицы левых и правых сингулярных векторов:

$$\Sigma_{m,m} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_m \end{bmatrix}, V_{m,m} = \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_m \\ | & & | \end{bmatrix}, R_{m,d} = \begin{bmatrix} | & & | \\ v_1 & \dots & v_d \\ | & & | \end{bmatrix}$$

В таком случае оценка дисперсии, сохраненной при преобразовании признакового пространства, получается по формуле [25–27]:

$$CVR = \frac{\sum_{j=1}^d \sigma_j}{\sum_j \sigma_j}. \quad (4)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Для удобства анализа приведем расчетные данные в виде графика на рис. 1.

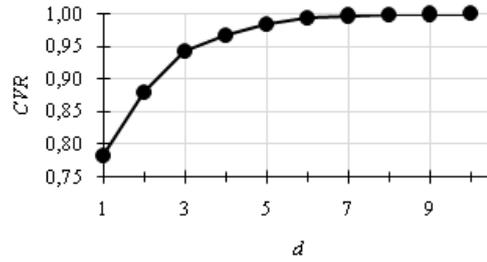


Рис. 1. Доля дисперсии, сохраненной при преобразовании признакового пространства

Можем заключить, что уже при 4-х сингулярных векторах, использованных для составления матрицы поворота R , доля сохраненной дисперсии превысит 0,95. Дальнейший анализ будем вести при $d = 4$.

В качестве основы для предлагаемой классификации используем разметку объектов, полученную с использованием алгоритма кластеризации k -средних. Суть алгоритма состоит в том, чтобы присвоить объектам метки принадлежности к кластерам с условием минимизации суммарной ошибки разбиения I [25–27]:

$$s = \arg \min_s I, I = \sum_{i=1}^k \sum_{y \in S_i} \|y - c_i\|_2^2, c_i = \frac{1}{\|S_i\|_1} \sum_{y \in S_i} y, \quad (5)$$

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

Решаемая задача относится к классу задач обучения без учителя, однозначное определение числа кластеров k в общем случае невозможно [25–27]. Для обоснования этого параметра рассмотрим суммарную ошибку разбиения I при $k = \text{var}$, результаты расчетов приведены в табл. 4.

Представим расчетные данные в виде графика (рис. 2).

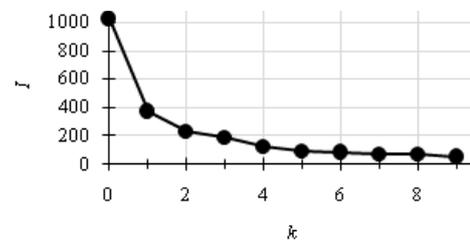


Рис. 2. Суммарная ошибка разбиения объектов при различном числе кластеров

По графику можем отметить, что при $k \geq 4$ характер функции $I(k)$ близок к линейному, и дальнейшее подразделение объектов нецелесообразно [25–27]. Таким образом, примем число кластеров $k = 4$.

Основные статистические характеристики объектов, сгруппированных в кластеры в соответствии с полученной разметкой, приведены в табл. 5.

Проиллюстрируем полученные результаты графиком на рис. 3.

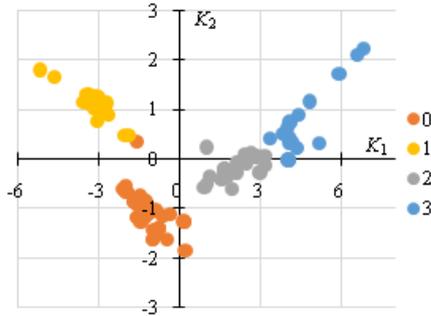


Рис. 3. Проекция объектов, сгруппированных в кластеры, на две главные компоненты

Можем отметить, что в полученной разметке кластеры обособлены, пересечений в проекции на две первые главные компоненты не отмечается.

Предложим классификацию гусеничных тракторов для лесозаготовительного производства, лесного и сельского хозяйства на основе полученных результатов. Границы варьирования характеристик гусеничных машин в классах получим пропорционально стандартным отклонениям признаков в соседних кластерах:

$$\max x_{j,k} = \mu_{j,k} + (\mu_{j,k+1} - \mu_{j,k}) \frac{S_{j,k}}{S_{j,k+1}} = \min x_{j,k+1}, \quad (6)$$

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

$$\min x_{j,0} = \max\{\min x_{j,0}; \mu_{j,0} - 2S_{j,3}\}, \max x_{j,3} = \mu_{j,3} + 2S_{j,3} \quad (7)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 1. Статистические данные по признакам

	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>TF</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>H</i>	<i>TL</i>	<i>TW</i>	<i>GC</i>	<i>V</i>
μ	4427	28,1	9,9	4907	1720	2 460	337	68	333	5,0
<i>S</i>	3 084,6	15,65	8,36	1 216,3	527,3	118,3	86,4	11,9	92,8	0,36
min	970	6,4	1,3	2 640	710	2 230	180	52,5	130	3,7
max	1 7210	74,3	41,4	8 921	2 490	2 745	450	81,5	450	5,7

В таблице и далее обозначено: μ — среднее значение; *S* — выборочное стандартное отклонение; min, max — соответственно минимальное и максимальное значение признака в выборке.

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции признаков

	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>TF</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>H</i>	<i>TL</i>	<i>TW</i>	<i>GC</i>	<i>V</i>
<i>M</i>	1,00	0,96	0,98	0,96	0,68	0,58	0,79	0,51	0,78	0,76
<i>N</i>	0,96	1,00	0,97	0,97	0,79	0,70	0,89	0,57	0,88	0,80
<i>TF</i>	0,98	0,97	1,00	0,97	0,70	0,64	0,82	0,54	0,81	0,74
<i>L</i>	0,96	0,97	0,97	1,00	0,76	0,71	0,86	0,54	0,86	0,80
<i>W</i>	0,68	0,79	0,70	0,76	1,00	0,83	0,88	0,31	0,89	0,73
<i>H</i>	0,58	0,70	0,64	0,71	0,83	1,00	0,84	0,29	0,85	0,66
<i>TL</i>	0,79	0,89	0,82	0,86	0,88	0,84	1,00	0,53	0,99	0,77
<i>TW</i>	0,51	0,57	0,54	0,54	0,31	0,29	0,53	1,00	0,48	0,23
<i>GC</i>	0,78	0,88	0,81	0,86	0,89	0,85	0,99	0,48	1,00	0,79
<i>V</i>	0,76	0,80	0,74	0,80	0,73	0,66	0,77	0,23	0,79	1,00

Таблица 3. Доля дисперсии, сохраненной при преобразовании признакового пространства

<i>d</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>CVR</i>	0,78	0,88	0,94	0,97	0,984	0,994	0,997	0,999	0,9995	1
<i>EVR</i>	0,78	0,10	0,06	0,024	,017	,010	,003	,002	,0009	,0005

В таблице обозначено: *EVR* — доля дисперсии, объясненной *d*-м признаком в пространстве главных компонент.

Таблица 4. Суммарная ошибка разбиения объектов при различном числе кластеров

<i>k</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

<i>I</i>	1 023,0	372,9	230,3	186,8	124,2	91,6	82,7	67,5	66,5	53,4
----------	---------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------

Таблица 5. Статистические характеристики объектов, сгруппированных в кластеры

	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>TF</i>	<i>L</i>	<i>W</i>	<i>H</i>	<i>TL</i>	<i>TW</i>	<i>GC</i>	<i>V</i>
Метка кластера "0"										
μ	1 813	13,0	2,8	3 745	1012	2 308	230	72	212	4,6
<i>S</i>	347,9	3,03	0,95	3 91,4	167,6	47,0	11,5	0,0	27,8	0,23
min	970	6,4	1,3	2 640	710	2230	180	72	130	3,7
max	2 650	20,4	5,6	4 300	1 550	2 441	250	72	250	4,8
Метка кластера "1"										
μ	3 149	20,8	6,1	4 385	1661	2451	304	53	304	5,0
<i>S</i>	577,8	3,62	1,44	262,0	293,9	56,5	12,5	3,2	12,5	0,23
in	430	5,4	,7	000	500	345	50	3	50	,7
max	4 553	29,8	10,2	5 332	2 440	2565	320	72	320	5,5
Метка кластера "2"										
μ	5 269	36,9	12,4	5486	2180	2563	426	79	426	5,2
<i>S</i>	688,5	5,84	2,49	461,5	204,5	52,6	25,5	3,1	25,5	0,17
min	3 615	24,4	8,2	4 450	1 960	2 470	400	76	400	4,9
max	6 410	45,4	18,3	6 140	2 480	2 635	450	82	450	5,5
Метка кластера "3"										
μ	10 318	55,9	26,3	7 097	2 289	2 569	450	82	450	5,5
<i>S</i>	3 082,6	9,92	6,58	843,6	111,7	99,0	0,0	0,0	0,0	0,23
min	7 815	44,2	18,1	6 067	2 189	2 482	450	82	450	5,2
max	17 210	74,3	41,4	8 921	2 490	2 745	450	82	450	5,7

Таблица 6. Предлагаемая классификация гусеничных тракторов

Класс	<i>M, т</i>	<i>N, кВт</i>	<i>TF, кН</i>	<i>L, мм</i>	<i>W, мм</i>	<i>H, мм</i>	<i>TL, см</i>	<i>TW, см</i>	<i>GC, мм</i>	<i>V, км/ч</i>
Сверх-легкие	0,9–2,6	5–20	< 5	2600–4700	700–1400	2200–2400	195–295	55–70	125–425	3–5
Легкие	2,6–4,9	20–30	5–10	4700–5000	1400–2400	2400–2600	295–365	55–80	425–375	5
Средние	4,9–6,4	30–50	10–20	5000–6400	2400–2400	2600–2600	365–450	80	375–450	5
Тяжелые	6,4–17,3	50–75	20–45	6400–9000	2400–2500	2600–2800	450–450	80–85	450–450	5–6

Приведем примеры практического использования полученных результатов.

Оценим коэффициент энергонасыщенности *KE* гусеничных машин в рамках предлагаемой классификации:

$$KE_{j,\min(\max)} = \frac{N_{j,\min(\max)}}{M_{j,\min(\max)}}, \quad (8)$$

причем в данном случае среднее значение *KE* рассчитаем так:

$$KE_j = \frac{N_{j,\min} + N_{j,\max}}{M_{j,\min} + M_{j,\max}}, \quad (9)$$

результаты расчета представлены на рис. 4.

Отметим близкие значения *KE* для сверхлегких, легких и средних машин по предлагаемой классификации, а также сравнительно более низкую оценку коэффициента для тяжелых машин. Если учесть положение о том, что соотношение мощности двигателя и массы машины пропорционально практическим опытом проектирования и эксплуатации гусеничной техники, то предлагаемая классификация подтверждает теоретические рекомендации [21] о нецелесообразности оснащать более тяжелые машины пропорционально более мощными двигателями (тенденция к увеличению мощности пропорционально массе машины отмечается у некоторых зарубежных

производителей, например, *John Deere* [8; 21]). Считаем целесообразным учесть данное наблюдение в дальнейших исследованиях, направленных на

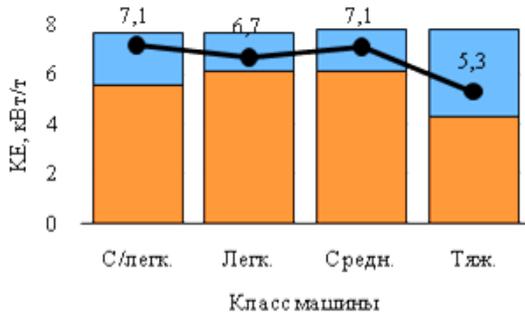


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента энергонасыщенности для гусеничных машин по классам

Далее вычислим среднее давление гусеничной машины на грунт p для каждого из классов следующим образом. Найдем минимальную и максимальную площадь пятна контакта A для j -го класса:

$$A_{j,\min(\max)} = 2k_B \cdot TL_{j,\min(\max)} \cdot TW_{j,\min(\max)}, \quad (10)$$

где $k_B = 0,35$, коэффициент перевода длины TL в длину пятна контакта с грунтом.

Затем по полученным данным рассчитаем значения p :

$$p_{j,\min(\max)} = \frac{M_{j,\min(\max)}}{A_{j,\max(\min)}}, \quad (11)$$

причем среднее давление:

$$p_j = \frac{M_{j,\min} + M_{j,\max}}{A_{j,\min} + A_{j,\max}}, \quad (12)$$

Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 5, 6.

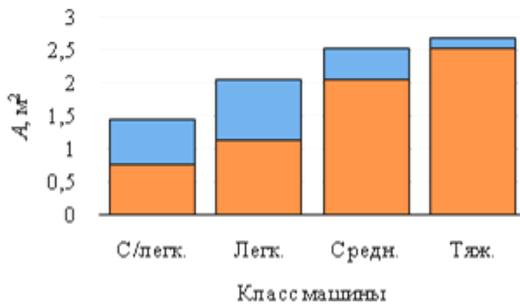
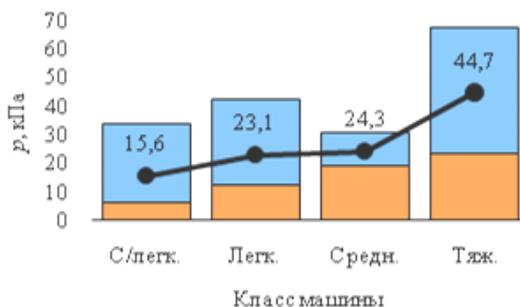


Рис. 5. Результаты расчета давления по пятну контакта для гусеничных машин по классам



разработку отечественной техники, замещающей импортную.

Рис. 6. Результаты расчета давления на грунт для гусеничных машин по классам

Для полученных оценок среднего давления выполним расчет глубины колеи, образующейся при работе на чувствительном лесном почвогрунте III категории. Расчет проведем по модели [21] для ширины и длины пятна контакта соответственно 0,73 м и 1,225 м, модуль деформации почвогрунта $E = 0,4$ МПа. В результате получим зависимость глубины колеи h от среднего давления p , представленную на рис. 7.

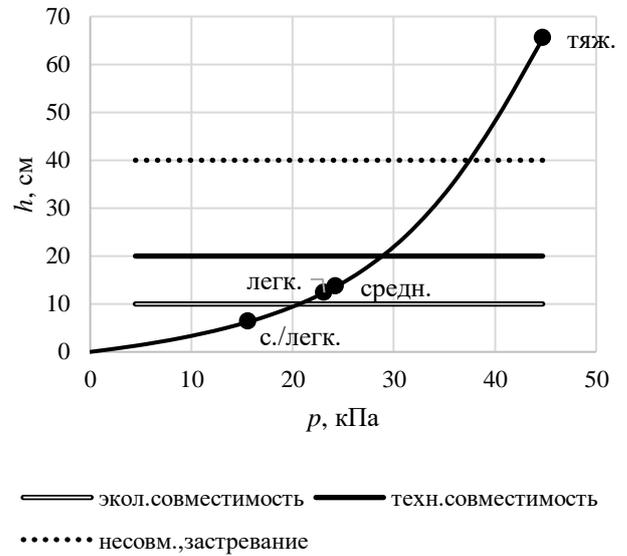


Рис. 7. Результаты расчета глубины колеи и оценка совместимости классов гусеничных машин с условиями чувствительного лесного почвогрунта III категории

Можем заметить, что сверхлегкие гусеничные машины совместимы с чувствительным лесным почвогрунтом с точки зрения экологии (глубина колеи менее 10 см), легкие и средние машины принципиально совместимы (глубина колеи менее 20 см, опорная проходимость обеспечена), тяжелые машины несовместимы с условиями в принципе (глубина колеи превышает клиренс машины).

Выводы. В результате выполненного анализа данных предложена классификация гусеничных тракторов, предназначенных для работы в лесозаготовительном производстве, лесном и сельском хозяйстве. Машины подразделяются на 4 класса по эксплуатационным характеристикам (сверхлегкие, легкие, средние и тяжелые машины).

В дальнейших исследованиях предполагается выполнить тестирование устойчивости классификации с использованием дополнительных статистических и модельных данных.

Полученные результаты позволяют уточнить диапазоны изменения параметров машин при реализации математических моделей, прогнозирующих показатели технологической и экологической эффективности

техники в рамках гранта РНФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

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

- 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.
- 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.
- Трушевский П.В., Куницкая О.А. Современные системы машин для очистки лесосек от порубочных остатков // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24-28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 121-126.
- Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Должиков И.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И. Повышение экологической эффективности лесозаготовительного производства в Дальневосточном федеральном округе // Деревообрабатывающая пром-сть. 2023. № 1. С. 28-43.
- Герц Э.Ф., Куницкая О.А., Макуев В.А., Дмитриев А.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И. Средоадаптивные технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области // Деревообрабатывающая пром-сть. 2023. № 1. С. 52-63.
- 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 республиканской науч.-практической конф. (29 янв. 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 7-9.
- 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.
- Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. ст. Всерос. науч.-практической конф. (10 марта 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 66-69.
- 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.
- 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.
- Куницкая О.А., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Степанищева М.В., Ревяко С.И., Друзьянова В.П. Технологические процессы сплошных и выборочных рубок леса при помощи универсальных лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 106-112.
- Трушевский П.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Макуев В.А., Ревяко С.И., Григорьева О.И. Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков // Resources and Technology. 2023. V. 20, № 4. P. 89-138.
- Куницкая О.А., Петров А.В., Кривошеев А.А., Швецов А.С., Дмитриев А.С., Михайлова Л.М. Анализ влияния природно-производственных условий на производительность тракторной трелевки // Вестн. АГАТУ. 2023. № 4 (12). С. 102-149.
- 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.
- Гринько О.И., Должиков И.С., Григорьева О.И. Лесопожарные комплексы на базе мини-тракторов // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24-28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 101-105.
- Каляшов В.А., Григорьев И.В., Иванов В.А., Юдилевич А.М., Бурмистрова О.Н., Охлопкова М.К., Григорьева О.И. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 94-101.
- До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне // Деревообрабатывающая пром-сть. 2022. № 2. С. 3-12.
- До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78-84.
- Куницкая О.А., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Калита Г.А., Ревяко С.И., Тимохов Р.С. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 57-63.
- Григорьева О.И., Макуев В.А., Барышникова Е.В., Бурмистрова О.Н., Швецова В.В., Григорьев И.В., Иванов В.А. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78-84.
- Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
- Андронов А.В., Петросян С.С., Егорин А.А., Ильющенко 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.
- 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.
- Сухов А.С., Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Друзьянова В.П., Теплов А.В., Задраускайте Н.О. Исследование моделей-классификаторов лесных машин на основе логистической регрессии // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2023. № 246. С. 297-310.
- Prince S. Understanding Deep Learning The MIT Press, 2023. 544 p.
- An introduction to machine learning with scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/tutorial/basic/tutorial.html> (дата обращения: 01.03.2024).
- Mehryar Mohri, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar. 2012. Foundations of Machine Learning. The MIT Press. URL: https://hlevkin.com/hlevkin/45MachineDeepLearning/ML/Foundation_s_of_Machine_Learning.pdf (дата обращения: 25.09.2024).

References

- 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.
- Kunickaya O.A., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V., Novikov M.S., Kalyashov V.A. Intermediate 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.
- Trushevskij P.V., Kunickaya O.A. Modern systems of machines for clearing cutting areas of waste residues // Aktual'nye problemy le-

- snogo hozyajstva i derevopererabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 121-126.
4. Ryabuhin P.B., Kunickaya O.A., Druz'yanova V.P., Dolzhikov I.S., Tihonov E.A., Grigor'eva O.I. Improving the environmental efficiency of logging production in the Far Eastern Federal District // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2023. № 1. P. 28-43.
 5. Gerc E.F., Kunickaya O.A., Makuev V.A., Dmitriev A.S., Tihonov E.A., Grigor'eva O.I. Environmental technologies for the development of logging sites in the conditions of the Sverdlovsk region // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2023. № 1. P. 52-63.
 6. Kalistratov A.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. On the importance of research on the ecological efficiency of the skidding process // Nauka, obrazovanie, innovacii v prigranichnom regione: materialy respublikanskoj nauch.-prakticheskoy konf. (29 yanv. 2015 g.). Petrozavodsk, 2015. P. 7-9.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Kunickaya O.A., Krivosheev A.A., Shvecov A.S., Stepanishcheva M.V., Revyako S.I., Druz'yanova V.P. Technological processes of continuous and selective logging using universal logging machines // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 106-112.
 12. Trushevskij P.V., Kunickaya O.A., Dolzhikov I.S., Makuev V.A., Revyako S.I., Grigor'eva O.I. Analysis of technical and technological solutions for clearing cutting areas from felling residues // Resources and Technology. 2023. V. 20, № 4. P. 89-138.
 13. Kunickaya O.A., Petrov A.V., Krivosheev A.A., Shvecov A.S., Dmitriev A.S., Mihajlova L.M. Analysis of the influence of natural production conditions on the productivity of tractor skidding // Vestnik ASAU (Scientific journal of Arctic State Agrotechnological University). 2023. № 4 (12). P. 102-149.
 14. 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 woodworking industries. 2023. № 6. P. 33-42.
 15. Grin'ko O.I., Dolzhikov I.S., Grigor'eva O.I. Forest fire complexes based on mini-tractors // Aktual'nye problemy lesnogo hozyajstva i derevopererabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 101-105.
 16. Kalyashov V.A., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A., Yudilevich A.M., Burmistrova O.N., Ohlopkova M.K., Grigor'eva O.I. Features of forest soils of the cryolithozone as an object of action of forest movers machines // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 94-101.
 17. Do T.A., Zlobina N.I., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigor'eva O.I., Hitrov E.G. Justification of technological parameters related to traction properties of tracked vehicles operating on a slope // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2022. № 2. P. 3-12.
 18. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigor'eva O.I., Hitrov E.G. Evaluation of traction properties of the propulsion of a forest husky machine operating on a slope // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 2 (54). P. 78-84.
 19. Kunickaya O.A., Makuev V.A., Storodubceva T.N., Kalita G.A., Revyako S.I., Timohov R.S. Problems of improving the quality of domestic forestry engineering // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 4 (56). P. 57-63.
 20. Grigor'eva O.I., Makuev V.A., Baryshnikova E.V., Burmistrova O.N., Shvecova V.V., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A. Prospects for import substitution of machine systems for artificial forest restoration // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 78-84.
 21. 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.
 22. 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.
 23. 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.
 24. Suhov A.S., Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Druz'yanova V.P., Teppoev A.V., Zdrauskajte N.O. The study of models classifiers of forest machines based on logistic regression // Izvestia SPbLTA. 2023. № 246. P. 297-310.
 25. Prince S. Understanding Deep Learning The MIT Press, 2023. 544 p.
 26. An introduction to machine learning with scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/tutorial/basic/tutorial.html> (data obrashcheniya: 01.03.2024).
 27. Mehryar Mohri, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar. 2012. Foundations of Machine Learning. The MIT Press. URL: https://hlevkin.com/hlevkin/45MachineDeepLearning/ML/Foundation_s_of_Machine_Learning.pdf (data obrashcheniya: 25.09.2024).