

## Анализ эксплуатационных характеристик современных харвестеров

А.А. Егорин<sup>1а</sup>, С.С. Петросян<sup>1b</sup>, А.В. Андронов<sup>1c</sup>, Е.Г. Хитров<sup>1d</sup>, М.В. Степанищева<sup>2e</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> lesbisnes@mail.ru, <sup>б</sup> petrosyan1974@yandex.ru, <sup>с</sup> andronovalexandr@gmail.com,

<sup>д</sup> yegorkhitrov@gmail.com, <sup>е</sup> marina01031977@inbox.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8246-3583>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Статья поступила 11.11.2021, принята 17.11.2021

*В предлагаемой статье выполнен анализ взаимосвязей эксплуатационных характеристик современных моделей харвестеров, выпускаемых ведущими производителями техники. Источниками данных для анализа послужили официальные сайты компаний-производителей Ecolog, HSM, John Deere, Komatsu, Logset, Ponsse, Rottne, Tigercat, Timberpro. Всего проанализированы характеристики 49 моделей колесных харвестеров. Выявлены линейные статистические связи массы базовой машины, мощности двигателя и развиваемого им тягового усилия, грузоподъемного момента манипулятора в вертикальной плоскости и крутящего момента манипулятора в горизонтальной плоскости. На основе результатов кластерного анализа предложено деление харвестеров на три класса. К классу «А» отнесены харвестеры с массой базовой машины 15–20 т. Мощность двигателя в классе «А» достигает 190 кВт, тяговое усилие — 190 кН. В рекомендуемой комплектации машины оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом до 250 кНм; в горизонтальной плоскости крутящий момент составляет до 50 кНм. К классу «В» отнесены харвестеры с массой базовой машины 20–25 т, мощность их двигателя составляет 200–250 кВт, тяговое усилие — до 230 кН. Машины оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом до 300 кНм; в горизонтальной плоскости крутящий момент достигает 60 кНм. К классу «С» отнесены харвестеры с массой базовой машины 25 т и более. Мощность двигателя составляет 200–250 кВт, тяговое усилие свыше 230 кН. В рекомендуемой комплектации машины оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом до 360 кНм, в горизонтальной плоскости крутящий момент достигает 80 кНм.*

**Ключевые слова:** сортиментная технология заготовки; колесные лесные машины; манипулятор; кластеризация.

## Analysis of the performance characteristics of modern harvesters

A.A.Egorin<sup>1а</sup>, S.S.Petrosyan<sup>1b</sup>, A.V. Andronov<sup>1c</sup>, E.G. Khitrov<sup>1d</sup>, M.V. Stepanishcheva<sup>2e</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> lesbisnes@mail.ru, <sup>б</sup> petrosyan1974@yandex.ru, <sup>с</sup> andronovalexandr@gmail.com,

<sup>д</sup> yegorkhitrov@gmail.com, <sup>е</sup> marina01031977@inbox.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8246-3583>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5493-1092>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Received 11.11.2021, accepted 17.11.2021

*The study analyses the relationships of the performance characteristics of modern models of harvesters produced by leading manufacturers of equipment. The official sites of manufacturers such as Ecolog, HSM, John Deere, Komatsu, Logset, Ponsse, Rottne, Tigercat, Timberpro are used as a source of data. In total, the characteristics of 49 wheeled harvesters' models are analyzed. The study reveals linear statistical relationships of the base machine mass, engine output and the tractive force, lifting moment of the manipulator and its' horizontal torque. Basing on the data clustering, the study proposes dividing the models into three classes. Harvesters with a base machine weight of 15-20 tons are classified as "A" class (the engine power is up to 190 kW, the tractive force is up to 190 kN; in the recommended configuration, the harvesters are equipped with manipulators with a lifting moment in up to approximately 250 kNm, the horizontal torque is up to 50 kNm). Harvesters with a base machine weight of 20-25 tons are classified as class "B" (the engine power is within 200-250 kW, the tractive force is up to 230 kN; the harvesters are equipped with manipulators with a lifting moment up to 300 kNm approximately, the horizontal torque is up to 60 kNm. Harvesters with a base machine weight of 25 tons and more are classified as class "C" (the engine power is 200-250 kW, the tractive force is over 230 kN; in the recommended configuration, the harvesters are equipped with manipulators with a lifting moment up to 360 kNm approximately, the horizontal torque is up to 80 kNm).*

**Keywords:** cut-to-length forest harvesting; wheeled forestry machines; manipulator; data clustering.

**Введение.** Многооперационные машины, в частности харвестеры, широко используются в отечественной и зарубежной практике заготовки древесины. Приобретая такую дорогостоящую технику, лесозаготовители ориентируются на достижение высоких технико-экономических показателей лесосечных работ, неотъемлемой частью которых становится экологичность [1–3]. Вместе с тем, в научной литературе сравнительно слабо проработаны вопросы воздействия движителей харвестеров на лесные грунты; основное внимание исследователей сосредоточено на трелевочных машинах [1; 4–6]. Важно отметить, что воздействие движителей харвестеров на грунт имеет сложный характер [3; 6] и обусловлено не только непосредственно движением машин по опорной поверхности, но и динамическими нагрузками, сообщаемыми грунту через движитель при обработке деревьев. Величина таких нагрузок зависит, в том числе, от характеристик манипуляторов и навесного оборудования. Для разработки практических рекомендаций по подбору харвестеров с учетом производительности и экологической совместимости потребуются дальнейшие исследования, связанные с разработкой программ и реализацией вычислительных экспериментов. В этой связи потребуются сведения о взаимосвязях эксплуатационных характеристик современных моделей харвестеров, предлагаемых ведущими производителями техники.

**Материалы и методы.** Источниками сведений об эксплуатационных характеристиках техники служат официальные сайты компаний-производителей [7–15]. Всего проанализированы характеристики 49 моделей колесных харвестеров Ecolog, HSM, John Deere, Komatsu, Logset, Ponsse, Rottne, Tigercat, Timberpro. При обработке полученных данных использованы методы аппроксимации данных (метод наименьших квадратов) и кластерного анализа (метод  $k$ -средних [18]). Использованы сведения о массе  $M$ , мощности  $N$  и тяговом усилии  $F$  двигателя, моменте манипулятора в вертикальной  $LM$  и горизонтальной  $HM$  плоскости, номинальном давлении движителя на грунт  $NGP$  по формуле [16; 17]:

$$NGP = \frac{M}{2nBd}, \quad (1)$$

где  $B$  — ширина колеса;  $d$  — диаметр колеса;  $n$  — число осей.

Сведения проанализированы для машин в стандартной комплектации, рекомендуемой производителями.

Алгоритм метода  $k$ -средних реализован в среде MS Excel. Решалась задача оптимального разбиения моделей машин на группы (кластеры) по условию минимума ошибки разбиения [18]:

$$\varepsilon = \sum_{q=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left( \frac{w_j |x_{j,i} - c_{j,q}|}{R_j} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $c$  — координата центра тяжести кластера;  $R$  — размах выборки;  $w$  — вес признака;  $k$  — число кластеров;  $m$  — число признаков, по которым

проводится кластеризация;  $n$  — размер выборки, индекс  $i$  соответствует номеру модели машины;  $j$  — номер признака, по которому проводится группировка;  $q$  — номер кластера.

Применялся следующий порядок реализации алгоритма:

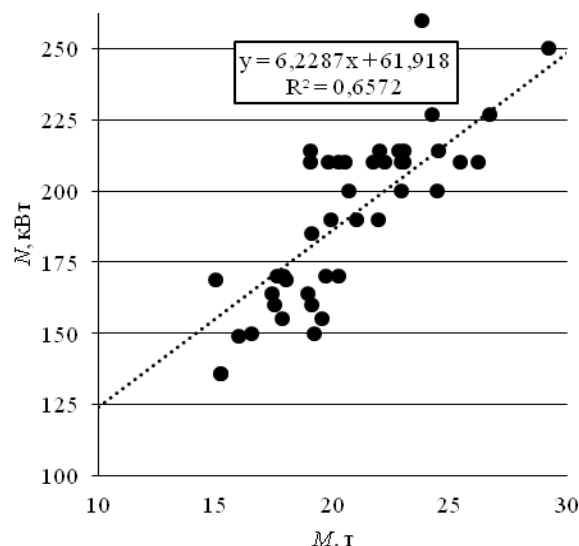
1. Принимается число кластеров данных  $k$ , и произвольно задаются их центры тяжести.

2. Каждую модель следует отнести к определенному кластеру с ближайшим центром, т. е. с минимальным расстоянием, по формуле (2).

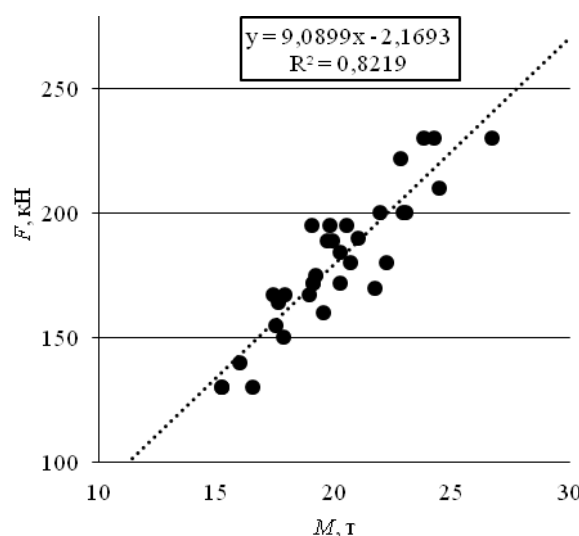
3. В результате разделения моделей по кластерам вычисляются их новые центры (координаты соответствуют средним арифметическим значениям признаков в  $q$ -м кластере).

4. Шаги 2, 3 повторяются до тех пор, пока центры кластеров не стабилизируются.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Сведения о  $N$ ,  $F$ ,  $LM$  и  $HT$  для исследованных моделей машин сопоставлены с  $M$  на рис. 1–4.



**Рис. 1.** Сопоставление массы базовой машины и мощности двигателя



**Рис. 2.** Сопоставление массы базовой машины и максимального развиваемого тягового усилия

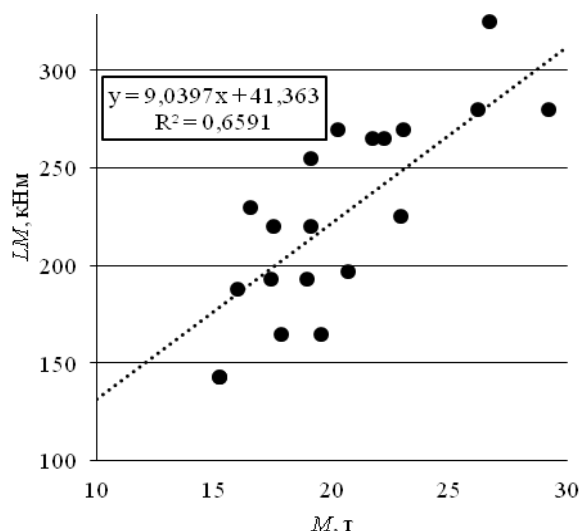


Рис. 3. Сопоставление массы базовой машины и грузоподъемного момента манипулятора

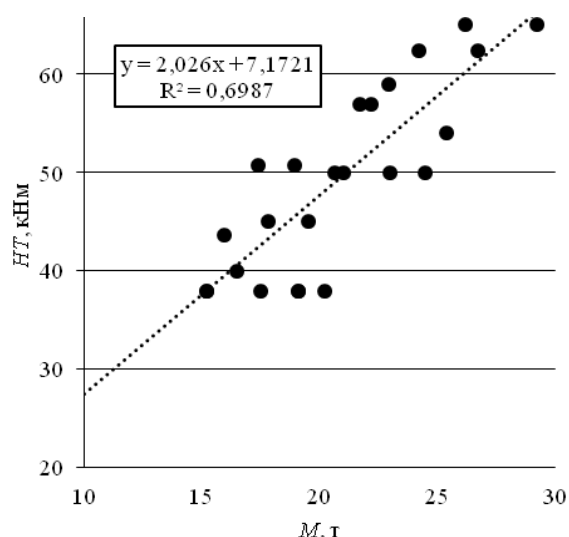


Рис. 4. Сопоставление массы базовой машины и момента манипулятора в горизонтальной плоскости

В табл. 1 приведены основные сведения о вариативности характеристик харвестеров в полученной выборке данных.

В результате аппроксимации данных получим приближенные зависимости для оценки  $N$ ,  $F$ ,  $LM$ ,  $HT$  по  $M$ :

$$N = 1,2287M + 1,918, \quad (3)$$

$$F = 1,0899M - 1,693, \quad (4)$$

Таблица 1. Основные сведения о вариативности характеристик харвестеров

	$M, m$	$N, кВм$	$F, кН$	$LM, кНм$	$HT, кНм$
min	15,00	136,00	130,00	143,00	35,85
max	34,00	260,00	289,49	363,14	78,89
AV	21,02	192,85	187,91	230,82	49,65
S	3,727	29,910	32,586	46,454	8,755

Примечание. В таблице обозначено: min — минимальное значение; max — максимальное значение; AV — среднее арифметическое; S — стандартное отклонение.

$$LM = 9,0397M - 1,363, \quad (5)$$

$$HT = 2,026M + 7,1721. \quad (6)$$

Рассчитанные значения коэффициентов детерминации  $R^2$  (рис. 1–4) для моделей (3)–(6) свидетельствуют о возможности использования полученных выражений при разработке автоматизированных систем [19; 20], предназначенных для оценки основных технологических показателей заготовки древесины.

Обратим внимание, что номинальное давление на грунт  $NGP$  практически не зависит от массы базовой машины  $M$  (рис. 5).

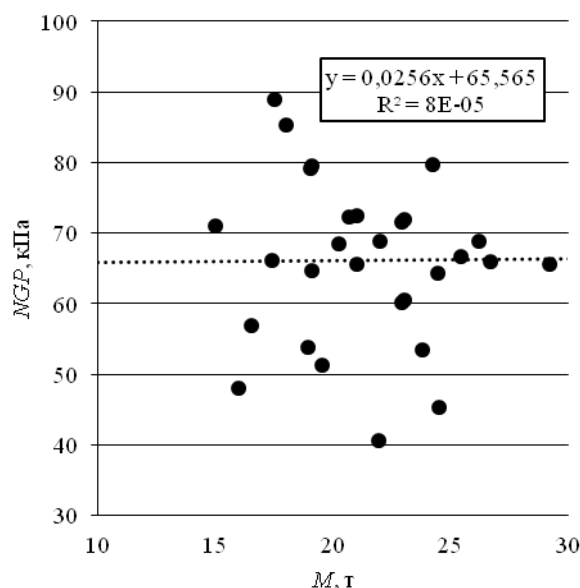


Рис. 5. Сопоставление массы базовой машины и номинальное давление двигателя на грунт

Величина  $NGP$  изменяется в диапазоне от 40 до 90 кПа, что сопоставимо с несущей способностью лесных почвогрунтов средней прочности. Отсутствие статистической связи вызвано особенностями оснащения харвестеров различными шинами. Вероятно, это связано с различным опытом производителей техники, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях показателей воздействия двигателей харвестеров на лесной грунт.

Ввиду тесных статистических связей  $N$ ,  $F$ ,  $LM$ ,  $HT$ ,  $M$  используем эти показатели в качестве признаков при кластеризации данных.

Результаты, полученные после пяти итераций метода  $k$ -средних, приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Границы изменения эксплуатационных характеристик колесных харвестеров по кластерам

Кластер	$M, t$	$N, кВт$	$F, кН$	$LM, кНм$	$HT, кНм$
1	15–20,21	136–185	130–189	143–255	35,85– 50,8
2	19–25,4	190–260	170–230	188–310	38–59
3	24,2–34	210–250	229–289,49	280–363,14	62,4–78,89

На настоящем этапе исследования, опираясь на результаты кластеризации, выделим три класса харвестеров А, В, С и условно охарактеризуем их как легкий, средний и тяжелый соответственно. В предлагаемых классах границы изменения эксплуатационных характеристик приблизительно соответствуют границам варьирования признаков при делении выборки данных на три кластера по методу  $k$ -средних:

• Класс «А». Харвестеры с массой базовой машины 15–20 т. Мощность двигателя до 190 кВт, тяговое усилие до 190 кН. В рекомендуемой комплектации оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом в вертикальной плоскости до 250 кНм ориентировочно; в горизонтальной плоскости крутящий момент составляет до 50 кНм.

• Класс «В». Харвестеры с массой базовой машины 20–25 т. Мощность двигателя 200–250 кВт, тяговое усилие до 230 кН. В рекомендуемой комплектации оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом в вертикальной плоскости до 300 кНм ориентиро-

вочно; в горизонтальной плоскости крутящий момент составляет до 60 кНм.

• Класс «С». Харвестеры с массой базовой машины 25 т и более. Мощность двигателя 200–250 кВт, тяговое усилие свыше 230 кН. В рекомендуемой комплектации оснащаются манипуляторами с грузоподъемным моментом в вертикальной плоскости до 360 кНм ориентировочно; в горизонтальной плоскости крутящий момент составляет до 80 кНм.

Предлагаемая классификация позволит упростить составление системы рекомендаций по подбору машин с учетом природно-производственных условий конкретного предприятия.

*Авторский вклад.* А.А. Егорин — идея исследования, сбор и анализ данных, формулирование выводов (35 %); С.С. Петросян — сбор и анализ данных (25 %); А.В. Андронов — идея исследования, анализ данных (15 %); М.В. Степанищева — анализ данных (15 %); Е.Г. Хитров — общее руководство работой (10 %).

#### Литература

- Horodnic S. A risk index for multicriterial selection of a logging system with low environmental impact // Environmental Impact Assessment Review. 2015. V. 51. P. 32-37.
- Khitrov E., Grigorev G., Dmitrieva I. Theoretical estimation of soil resistance to forestry vehicles turning // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020. P. 757-762.
- Khitrov E.G., Iliushenko D.A., Kalistratov A.V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation «Actual Issues of Transport in the Forest Sector», 2020. P. 012015.
- Triplat M., Prislán P., Krajnc N. Decision-Making Tool for Cost-Efficient and Environmentally Friendly Wood Mobilisation // South-east European forestry. 2015. № 6 б. P. 179-190.
- Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
- Хитров Е.Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // Resources and Technology. 2019. V. 16. № 4. P. 76-93.
- Официальный веб-сайт компании Ecolog. URL: <https://ecologforestry.com/en/products/harvesters/> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании John Deere. URL: <https://www.deere.com/en/wheeled-harvesters/> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Rottne. URL: <https://www.rottnet.com/en/skogsmaskiner/skordare/> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Ponsse. URL: <https://www.ponsse.com/en/web/guest/products/harvesters#/> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Logset. URL: <https://www.logset.com/en/harvesters> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Komatsu. URL: <https://www.komatsuforest.com/forest-machines/our-wheeled-harvesters> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании HSM. URL: <https://www.hsm-forest.net/harvester.html> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Tigercat. URL: <https://www.tigercat.com/products/wheel-harvester/> (дата обращения: 01.10.2021).
- Официальный веб-сайт компании Timberpro. URL: <http://timberpro.com/Brochures/brochure-600D.html> (дата обращения: 01.10.2021).
- Khitrov E.G., Andronov A.V. Comparison of the forest machine mover average and nominal pressure on the soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. 108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012021.
- Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 649-656.

18. Aggarwal Ch., Reddy Ch. Data clustering. Algorithms and Applications // Chapman and Hall, 2013. 652 p.
19. Šušnjar M., Horvat D., Andrija K., Pandur Z. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. № 29. P. 40-62.
20. Horvat D., Zečić Ž., Šušnjar M. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2007. № 28 (1). P. 11-25.
9. Rottne company official website. URL: <https://www.rottnet.com/en/skogsmaskiner/skordare/> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
10. Ponsse company official website. URL: <https://www.ponsse.com/en/web/guest/products/harvesters#/> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
11. Logset company official website. URL: <https://www.logset.com/en/harvesters> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
12. Komatsu company official website. URL: <https://www.komatsuforest.com/forest-machines/our-wheeled-harvesters> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
13. HSM company official website. URL: <https://www.hsm-forest.net/harvester.html> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
14. Tigercat company official website. URL: <https://www.tigercat.com/products/wheel-harvester/> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
15. Timberpro company official website. URL: <http://timberpro.com/Brochures/brochure-600D.html> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
16. Khitrov E.G., Andronov A.V. Comparison of the forest machine mover average and nominal pressure on the soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 108, Development, Research, Certification. Ser. 108th International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers «Intelligent Car Systems: Development, Research, Certification», 2019. P. 012021.
17. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. SOILS; FOREST ECOSYSTEMS. Sophia, 2019. P. 649-656.
18. Aggarwal Ch., Reddy Ch. Data clustering. Algorithms and Applications // Chapman and Hall, 2013. 652 p.
19. Šušnjar M., Horvat D., Andrija K., Pandur Z. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. № 29. P. 40-62.
20. Horvat D., Zečić Ž., Šušnjar M. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2007. № 28 (1). P. 11-25.

#### *References*

1. Horodnic S. A risk index for multicriterial selection of a logging system with low environmental impact // Environmental Impact Assessment Review. 2015. V. 51. P. 32-37.
2. Khitrov E., Grigorev G., Dmitrieva I. Theoretical estimation of soil resistance to forestry vehicles turning // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020. P. 757-762.
3. Khitrov E.G., Iliushenko D.A., Kalistratov A.V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation «Actual Issues of Transport in the Forest Sector», 2020. P. 012015.
4. Triplat M., Prislán P., Krajnc N. Decision-Making Tool for Cost-Efficient and Environmentally Friendly Wood Mobilisation // South-east European forestry. 2015. № 6 b. P. 179-190.
5. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
6. Hitrov E.G. Analysis of soil sinkage components caused by a forestry vehicle passage // Resources and Technology. 2019. V. 16. № 4. P. 76-93.
7. Ecolog company official website. URL: <https://ecologforestry.com/en/products/harvesters/> (data obrashcheniya: 01.10.2021).
8. John Deere company official website. URL: <https://www.deere.com/en/wheeled-harvesters/> (data obrashcheniya: 01.10.2021).