

УДК 625.711.84

**Ю. И. Мисуно, П. А. Протас**

Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ  
С ЛЕСНЫМИ ПОЧВОГРУНТАМИ НА ПАРАМЕТРЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОСЕКИ**

Анализ и оценка взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами является одной из сложнейших задач при проектировании технологического процесса лесосечных работ. Особенно если речь идет о разработке участков, чувствительных к воздействию лесозаготовительной техники. Для реализации работы высокопроизводительной техники на слабонесущих почвогрунтах с максимальной эффективностью и минимальным воздействием на лесной почвогрунт разработано большое количество рекомендаций. Однако зачастую применение этих рекомендаций ограничено или вовсе не предусмотрено в действующих нормативных документах Республики Беларусь. С учетом изменчивости природно-климатических условий произрастания лесонасаждений лесопользователям необходимо стремиться обеспечивать своевременное освоение лесных ресурсов с минимальными затратами и наименьшим риском критического повреждения лесных почв.

В данной статье показаны результаты работы по исследованию влияния параметров технологических элементов лесосеки на степень повреждения почвогрунта. В частности, были рассмотрены способы снижения негативного воздействия движителя лесной машины на почвогрунт за счет изменения параметров пашки и устройства погрузочного пункта, в комплексе с изменением рейсовой нагрузки, внутреннего давления воздуха в шинах и т. д. Предложены рекомендации по реализации мер по снижению уплотнения почвогрунта. А также представлены направления для дальнейшего изучения вопросов по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами.

**Ключевые слова:** технологический процесс, лесные почвогрунты, технологические элементы лесосеки, движитель, уплотнение.

**Yu. I. Misuno, P. A. Protas**

Belarusian State Technological University

**THE INFLUENCE OF INDICATORS OF THE INTERECTION OF MOVER  
WITH FOREST SOILS ON THE PARAMETRS  
OF THE TECHNOLOGICAL ELEMENTS OF THE CUTTING AREA**

The analysis and assessment of the interaction of forest machines thrusters with soil is one of the most difficult tasks in the design process of logging operations. Especially when it comes to the development of areas sensitive to the effects of logging equipment. A large number of recommendations have been developed for the implementation of the work of high-performance equipment on weakly bearing soils with maximum efficiency and minimal impact on forest soils. However, often the application of these recommendations is limited or not at all stipulated in the current regulatory documents of the Republic of Belarus. Taking into account the variability of natural and climatic conditions for the growth of forest plantations, forest users should use every opportunity to ensure the timely development of forest resources with minimal costs and with the lowest risk of critical damage to forest soils.

This article shows the results of work on the study of the influence of the parameters of the technological elements of the cutting area on the degree of damage to the soil. In particular, methods were considered to reduce the negative impact of a forest machine driver on a soil by changing the parameters of the apiary and the loading point, in conjunction with changing the regular load, the internal air pressure in the tires, etc. Recommendations for the implementation of measures to reduce soil compaction are proposed. And also presents directions for further study of issues for assessing the operational and environmental compatibility of forest machines with soil grounds.

**Key words:** technological process, forest soils, technological elements of the cutting area, mover, compaction.

**Введение.** Проектирование технологического процесса лесосечных работ – это ответственный и достаточно сложный процесс планирования выполнения лесозаготовительных

операций. Особенно если речь идет о разработке участков, чувствительных к воздействию лесозаготовительной техники. В данном случае сложность заключается в выборе такой системы

машин и технологии работ, при которых негативное влияние, оказываемое на лесной почвогрунт, будет минимальным. А как известно, особенно губительным является воздействие ходовых систем лесных машин на влажные и переувлажненные почвогрунты [1], в результате чего возникает переуплотнение почвы, разрушение ее структуры, колееобразование, минерализация и т. д. Наиболее значимыми из них являются уплотнение почвы и колееобразование [2–6].

Важная часть проектирования лесосечных работ – это прогнозирование возможного повреждения лесного почвогрунта и принятие соответствующих мер по предотвращению критического ущерба, наносимого движителем лесной машины. Эта проблема не теряет своей актуальности, поскольку процент машинной заготовки в Республике Беларусь и во всем мире ежегодно растет.

Для различных природно-производственных условий разработаны отдельные технологические процессы, которые обеспечивают необходимую эффективность выполнения лесосечных работ. В то же время для освоения заболоченных участков было разработано большое количество рекомендаций по смягчению последствий работы техники на почвогрунты: установка съемных гусениц на танدمные тележки машин, применение шин повышенной проходимости или шин с низким и сверхнизким внутренним давлением воздуха в шинах, армирование трелевочных волоков порубочными остатками, организация сезонности выполнения работ и т. д. [7, 8]. В данной работе основное внимание было уделено исследованию влияния параметров технологических элементов лесосеки на степень повреждения почвогрунта при трелевке лесоматериалов форвардером.

**Основная часть.** Под технологическими элементами понимаются участки лесосеки, занятые под волоки, подъездные пути, погрузочные площадки, места складирования древеси-

ны, топливно-смазочных материалов, размещения бытовых помещений, стоянки техники [9].

Типовые схемы расположения технологических элементов лесосеки показаны на рисунке. Их расположение и параметры зависят от выбираемой технологии разработки лесосеки, которая, в свою очередь, будет проектироваться исходя из вида заготавливаемых лесоматериалов, природно-производственных условий и применяемой системы машин.

Потому предлагается решать вопрос с точки зрения обеспечения минимизации негативного влияния лесозаготовительных машин на слабых почвогрунтах по всей площади лесосеки.

В данной работе были проведены теоретические исследования по обоснованию параметров технологических элементов лесосеки, при которых ущерб на почвогрунт будет минимальным, а эффективность лесозаготовительного производства оптимальной.

**Методика расчета.** Как уже упоминалось ранее, наиболее значимым повреждением лесного почвогрунта является уплотнение почвы. Ущерб, наносимый в этом случае, оказывает влияние на физико-механические, химические и биологические свойства почвы, которые непосредственно связаны с продуктивностью и возобновлением леса.

Степень уплотнения почвогрунта движителями машин зависит от двух типов факторов: управляемых и неуправляемых. К управляемым относятся вес машины и перевозимого груза, конструктивные параметры ходовых систем, количество проходов машины по одному следу и т. д. К неуправляемым факторам относятся характеристики почвогрунта: механический состав почвы, ее влажность, первоначальная плотность и др. Соответственно, именно за счет управляемых факторов можно запланировать необходимые мероприятия по снижению уплотнения почвогрунта при работе техники в заданных почвенно-грунтовых условиях.

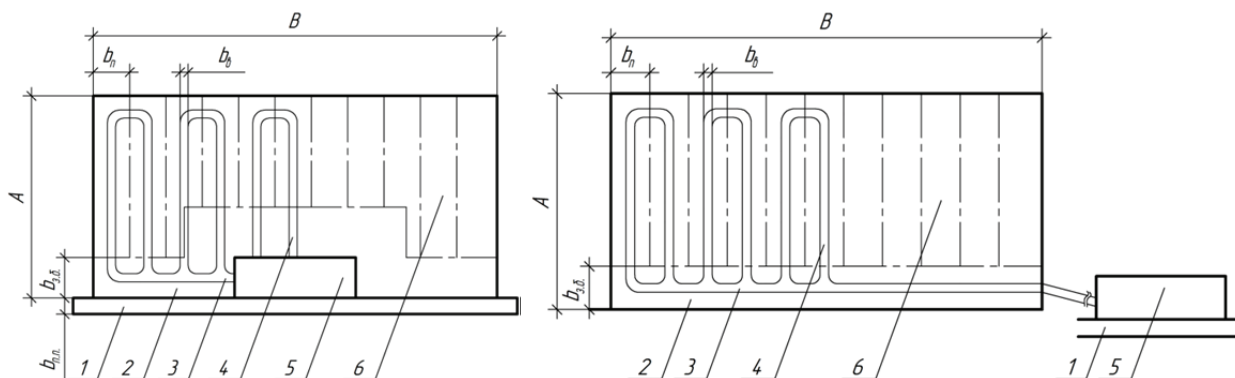


Схема расположения технологических элементов лесосеки:

- 1 – подъездной путь; 2 – зона безопасности; 3 – магистральный трелевочный волок;  
4 – пасечный трелевочный волок; 5 – погрузочный пункт; 6 – пасека

Определение степени уплотнения почвогрунта проводилось по методике, разработанной Жураковским В. П., которая основана на физической сущности процессов деформирования грунта [10].

Согласно предложенной методике, плотность почвы после воздействия нагрузки определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 + \frac{\rho_{\text{ТВ}}}{1 + \frac{E}{q_{\text{max}} \cdot K_d \cdot K_F}}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность грунта, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ТВ}}$  – плотность твердых частиц, г/см<sup>3</sup>;  $E$  – модуль деформации, Па;  $q_{\text{max}}$  – максимальное давление движителя на почвогрунт, Н;  $K_d$  – коэффициент динамичности;  $K_F$  – коэффициент площади.

Коэффициент динамичности учитывает влияние скорости движения техники и число проходов на процессы деформирования грунта и определяется по формуле

$$K_d = \frac{1}{1 + \frac{v \cdot K_F}{\varphi_0 \cdot l \cdot n}}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость движения машины, м/с;  $\varphi_0$  – угол внутреннего трения;  $l$  – длина линии контакта колеса с грунтом, м;  $n$  – число проходов по одному следу.

Количество проходов трелевочного трактора по пасечному волоку можно определить по формуле

$$n = \frac{M}{V_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где  $M$  – запас на ленте (пасеке), м<sup>3</sup>;  $V_{\text{п}}$  – объем трелеваемой пачки, м<sup>3</sup>.

Запас древесины на ленте (пасеке) определяется следующим образом:

$$M = \frac{b_{\text{л}} \cdot (a - b_3) \cdot q_{\text{га}}}{10\,000} \cdot i, \quad (4)$$

где  $b_{\text{л}}$  – ширина разрабатываемой ленты (пасеки), м;  $a$  – ширина лесосеки, м;  $b_3$  – ширина зоны безопасности, м;  $q_{\text{га}}$  – запас леса на одном гектаре, м<sup>3</sup>;  $i$  – интенсивность рубки.

Коэффициент площади учитывает распределение напряжений в грунте по глубине залегания слоев в зависимости от площади деформатора:

$$K_F = \frac{1}{1 + \frac{(K_z \cdot z)^2}{F_{\text{к}}}}, \quad (5)$$

где  $K_z$  – коэффициент затухания напряжений в почвогрунте;  $z$  – глубина залегания слоя, м;  $F$  – площадь отпечатка колеса, м<sup>2</sup>.

$$K_z = \frac{0,64 \cdot h_{\text{г}} + 0,64 \cdot b}{h_{\text{г}}}, \quad (6)$$

где  $h_{\text{г}}$  – деформация грунта (глубина колеи), м;  $b$  – ширина отпечатка колеса, м.

Величина допустимой плотности почвогрунта после нагрузки зависит от состава лесонасаждений. Установлено [11], что статическое давление машины на почву более 80 кПа препятствует развитию мелких корней, а при давлении на почву 30–50 кПа их рост может быть затруднен. Прекращается рост корней при плотности почвы более, г/см<sup>3</sup>: для дуба – 1,89; березы – 1,80; сосны – 1,72; ели – 1,61. При давлении на почву 90 кПа прирост молодняков уменьшается на 15% в течение первых 4–5 лет.

Степень уплотнения почвогрунта непосредственно зависит от оказываемого давления движителя лесных машин на поверхность движения. Для определения данного показателя в качестве основы была выбрана методика оценки давления по ГОСТ 26955-86 [12]. Эта методика была разработана для сельскохозяйственных машин. Потому в своем первоначальном виде она не предназначена для расчета давления движителей лесных машин, осуществляющих свою работу на лесосеке. Приняв ее в качестве базовой, были изменены некоторые расчетные формулы, которые позволили приблизить методику к условиям лесозаготовительных работ. Изменение расчетных формул осуществлялось на основании исследований профессора Агейкина Я. С. [13].

Для определения значений максимального давления колесного движителя на почву необходимо знать среднее давление движителя на основание, контурную площадь контакта, а также ширину и длину контакта колеса с грунтом.

Для расчета максимального и среднего давлений колесного движителя на опорную поверхность воспользуемся первоначальной зависимостью, приведенной в стандартной методике:

$$q_{\text{max}} = \frac{K_2 \cdot q_{\text{ср}}}{K_1}, \quad (7)$$

где  $K_2$  – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины с грунтом,  $K_2 = 1,5$ ;  $q_{\text{ср}}$  – среднее давление колесного движителя на основание, кПа;  $K_1$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины (табл. 1).

Таблица 1  
Численные значения коэффициента  $K_1$

Наружный диаметр шины, м	До 0,6	Свыше 0,6 до 0,8	Свыше 1 до 1,2	Свыше 1,2 до 1,5	Свыше 1,5
Коэффициент $K_1$	1,6	1,4	1,2	1,15	1,1

Среднее давление колесного движителя на жесткое основание определяется по формуле

$$q_{\text{ср}} = \frac{G_{\text{к}}}{F_{\text{к}}}, \quad (8)$$

где  $G_{\text{к}}$  – вертикальная нагрузка на опорное основание, кН.

Для определения площади контакта колеса на жестком основании примем форму отпечатка колеса в форме эллипса. Тогда контурную площадь контакта колеса найдем по формуле

$$F_{\text{к}} = \frac{\pi}{4} \cdot l \cdot b. \quad (9)$$

Первоначальные формулы по определению параметров отпечатков колеса были заменены на приведенные ниже зависимости, представленные в работе [13]. Данные формулы помогают определить величину площади контакта колеса с мягким почвогрунтом, что позволяет максимально адаптировать расчетную методику к условиям работы техники на лесных почвогрунтах.

Величина ширины отпечатка колеса определяется из уравнения

$$b = b_{\text{пр}} + \frac{10 \cdot (B + h_z - b_{\text{пр}}) \cdot h_{\text{г}}}{H - h_z + 10 \cdot h_{\text{г}}}, \quad (10)$$

где  $b_{\text{пр}}$  – ширина проектора шины, м;  $B$  – ширина профиля шины, м;  $h_z$  – нормальный прогиб шины, м;  $H$  – высота профиля шины, м.

Для определения нормального прогиба шины в зависимости от нагрузки и давления воздуха в шинах использовали следующую эмпирическую формулу

$$h_z = \frac{K \cdot G_{\text{к}}^{3/4}}{(1 + p_w)}, \quad (11)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент, определяемый экспериментально и имеющий следующие значения: для диагональных шин низкого давления – 0,41–0,74; для шин с регулируемым давлением – 0,45–0,63; для широкопрофильных шин – 0,25–0,5;  $p_w$  – внутреннее давление воздуха в шине, кПа.

Длина контакта определяется по следующей зависимости:

$$l = \sqrt{D \cdot h_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h_z + h_{\text{г}}) - (h_z + h_{\text{г}})^2}, \quad (12)$$

где  $D$  – диаметр колеса, м.

**Результаты.** Для выполнения расчетов принимались следующие исходные данные.

Для сравнения были выполнены расчеты для трех типов лесных почв, которые соответствуют II, III и IV типам местности: супесь, суглинок и переувлажненный суглинок. Их характеристики представлены в табл. 2 [14].

Таблица 2  
Характеристика типов лесных почв

Параметр	Супесь	Суглинок	Тяжелый суглинок
Несущая способность, кН/м <sup>2</sup>	40–70	30–60	20–30
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4–1,7	1,5–1,8	1,6–1,9
Плотность твердых частиц, г/см <sup>3</sup>	2,68–2,72	2,69–2,73	2,71–2,76
Модуль деформации, МПа	3,0	1,0	0,4
Толщина деформируемого слоя, м	0,3	0,4	0,8
Угол внутреннего трения, град	16	15	11

Параметры лесосеки принимались типовыми для условий Республики Беларусь: ширина лесосеки – 100 м; ширина зоны безопасности – 25 м; запас древесины на 1 га – 210 м<sup>3</sup>/га. Расчет давления движителя на почвогрунт осуществлялся для полностью загруженного форвардера «Амкодор-2661-01». Технические характеристики форвардера и устанавливаемых шин представлены в работе [15]. Расчет площади контакта колеса с опорной поверхностью и максимального давления движителя на почву осуществлялся для заднего колеса тандемной тележки. Распределение нагрузки между передними и задними колесами для загруженного форвардера принималось равным 70/30%.

Результаты расчета представлены в табл. 3, 4.

Самые высокие показатели уплотнения наблюдаются у суглинистых почв. По сравнению с их первоначальной плотностью после прохода техники данный показатель увеличивается более чем в 1,5 раза для суглинистых и в 2 раза для переувлажненных суглинистых почв. У супесчаных почв плотность после прохода техники составила 1,83 г/см<sup>3</sup>, что в 1,3 раза больше первоначального значения плотности.

Как показывают результаты расчетов, снижение ширины пасаки и уменьшение рейсовой нагрузки до минимально допустимых пределов позволяет обеспечить снижение степени уплотнения почвогрунта практически на 2–5%.

Таблица 3

Результаты расчета степени уплотнения почвогрунта с учетом внутреннего давления воздуха в шине, ширины пасаки, рейсовой нагрузки и числа проходов техники по одному следу, г/см<sup>3</sup>

Ширина пасаки, м	Объем трелюемой пачки, м <sup>3</sup>	Количество проходов	Внутреннее давление воздуха в шинах					
			$p_w = 300$ кПа			$p_w = 140$ кПа		
			Супесь	Суглинок	Переувлажненный суглинок	Супесь	Суглинок	Переувлажненный суглинок
18	13	3	1,830	2,553	3,260	1,822	2,472	3,177
10	13	2	1,858	2,532	3,231	1,812	2,453	3,150
18	7	4	1,805	2,441	3,146	1,766	2,371	3,068
10	7	3	1,799	2,430	3,130	1,762	2,362	3,054

Таблица 4

Результаты расчета уплотнения почвогрунта с учетом изменения рейсовой нагрузки и числа проходов техники по одному следу, г/см<sup>3</sup>

Количество проходов	Объем трелюемой пачки					
	$V_n = 13$ м <sup>3</sup>			$V_n = 7$ м <sup>3</sup>		
	Супесь	Суглинок	Переувлажненный суглинок	Супесь	Суглинок	Переувлажненный суглинок
2	1,858	2,532	3,254	1,787	2,410	3,124
3	1,870	2,553	3,275	1,798	2,430	3,147
4	1,876	2,563	3,286	1,804	2,441	3,158
5	1,880	2,570	3,292	1,807	2,447	3,165

Снижение внутреннего давления воздуха в шине позволяет снизить степень уплотнения почвогрунта после прохода техники при прочих равных условиях почти на 4%.

Влияние на уплотнение почвогрунта оказывает количество проходов техники по одному волоку, что напрямую зависит от параметров пасаки и среднего запаса древесины на 1 га. Так, при снижении количества проходов техники по одному волоку и объема трелюемой пачки до 7 м<sup>3</sup> можно обеспечить снижение уплотнения почвогрунта на 5–6%.

Согласно приведенным на рис. 1 схемам, при ширине пасаки 18 м технологические элементы лесосеки с погрузочным пунктом занимают 25,1%. При устройстве погрузочного пункта вне лесосеки – 16,7%. Если устанавливать ширину пасаки равной 10 м, то процент технологических элементов лесосеки составит 38,6 и 30% соответственно.

**Заключение.** Для обеспечения удовлетворительной экологической ситуации на лесосеке требуется чтобы движение лесных машин осуществлялось только по пасечным и магистральным волокам. При устройстве погрузочного пункта на лесосеке для соблюдения требований по ограничению площади ее технологических элементов пасаки должны иметь ширину не менее 18 м. С технической точки зрения работа харвестеров и форвардеров возможна при таких параметрах пасаки. Однако при большом запасе древесины на 1 га может значительно увеличиться плотность почвогрунта в результате большого количества прохода техники.

В данном случае рекомендуется при работе на суглинистых почвах уменьшать ширину пасаки до 10 м или вводить дополнительный магистральный волок. При этом погрузочный пункт рекомендуется устраивать не на территории лесосеки, а возле дорог общего пользования.

Недостатком увеличения числа волоков на лесосеке является увеличение степени минерализации почвы, которая может стать причиной возникновения эрозии. Однако на определенных режимах движения трелевочного трактора грунтозацепы шины могут производить интенсивное перемешивание растительного слоя с минеральной частью почвы, что, по мнению ученых-лесоводов, плодотворно влияет на возобновление леса. Доказано, что воздействие тракторной трелевки на поверхность вырубок может как ухудшать, так и улучшать ее лесорастительные свойства [16].

Тем не менее, как можно видеть из результатов расчетов, более существенного эффекта по снижению уплотнения слабонесущих почвогрунтов можно достичь за счет комплекса мероприятий. В дальнейшем необходимо проведение исследований по оценке степени уплотнения почвогрунта после прохода техники с различным типом движителя. На основании полученных результатов возможно провести обоснование оптимальных параметров движителей лесных машин. И уже на основании этого осуществлять расчет рекомендуемых параметров технологических элементов лесосеки.

### Литература

1. Андронов А. В., Валяжонков В. Д., Добрынин Ю. А. Снижение воздействия машин на почвогрунты при проведении рубок ухода // Вестник КрасГАУ. 2014. № 7 (94). С. 151–157.
2. Дручинин Д. Ю. Повреждение лесной почвенно-растительной среды при проведении лесозаготовительных работ // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 84–87.
3. Воздействие лесозаготовительной техники на лесную среду / Ю. Ю. Герасимов [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2008. № 21–3. С. 186–188.
4. Solgi A., Najafi A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // Journal of forest science. 2014. № 60 (1). P. 28–34.
5. Damage to soil and residual trees caused by different logging systems applied to late thinning / A. Cudzik [at al.] // Croatian Journal of Forest Engineering. 2017. № 38 (1). P. 83–95.
6. The impact of heavy traffic on forest soils: a review / M. Cambi [at al.] // Forest ecology and management. 2015. № 338. P. 124–138.
7. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Повышение работоспособности трелевочных волоков на заболоченных участках лесосечного фонда // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 25–28.
8. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Применение лесотранспортных машин с комбинированным типом движителя на слабонесущих почвогрунтах // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф., Рубцовск, 27–28 окт. 2017 г. / Рубцовск. индустр. ин-т. Рубцовск, 2017. С. 305–312.
9. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1360-2002. Введ. 09.12.2002. Минск: Госстандарт, 2002. 22 с.
10. Жураковский В. П. Оценка проходимости и вредного воздействия на почву многоосной колесной машины: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1993. 15 с.
11. Федоренчик А. С., Герман А. А., Протас П. А. Лесные машины «Амкодор». Минск: БГТУ, 2013. 240 с.
12. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву: ГОСТ 26955-86. Введ. 01.01.1987. М.: Гос. агропром. ком. СССР, 1987. 8 с.
13. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
14. Устинов В. В. Экспериментальные исследования сопротивления почвогрунта при вдавливания конического индентора // Лесотехнический журнал. 2016. № 3. С. 188–196.
15. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Исследование давления колесного движителя форвардера «АМКОДОР 2661-01» на опорную поверхность // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 251–258.
16. Шкрум В. Д. Уменьшение экологического ущерба от воздействия колесных трелевочных систем на лесную почву: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 20 с.

### References

1. Andronov A. V., Valyazhonkov V. D., Dobrynin Yu. A. Reducing the impact of cars on the soils during thinning. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2014, no. 7 (94), pp. 151–157 (In Russian).
2. Druchinin D. Yu. Damage the forest soil and plant environment at carrying out forest harvesting operations. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya"* [Materials of international scientific-technical conference "Logging industry: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 84–87 (In Russian).
3. Gerasimov Yu. Yu., Karvinen S., Syunev V. S., Katarov V. K. The impact of forestry equipment on the forest environment. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2008, no. 21–3, pp. 186–188 (In Russian).
4. Solgi A., Najafi A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of forest science*, 2014, no. 60 (1), pp. 28–34.
5. Cudzik A., Brennenstuhl M., Białczyk W., Czarnecki Ja. Damage to soil and residual trees caused by different logging systems applied to late thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, no. 38 (1), pp. 83–95.
6. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest ecology and management*, 2015, no. 338, pp. 124–138.

7. Misuno Yu. I., Protas P. A. Increasing of the operating capacity of skid roads on the swampy sites of timber cutting area. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya"* [Materials of international scientific-technical conference "Logging industry: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 25–28 (In Russian).
8. Misuno Yu. I., Protas P. A. Application of logging forwarders with combined type mover on weakly soils. *Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniye i perspektivy"* [Materials of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference "Modern equipment and technology: problems, status and prospects"]. Rubtsovsk, 2017, pp. 305–312 (In Russian).
9. STB 1360-2002. Sustainable forest management and forest use. Main felling. Technology requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2002. 22 p. (In Russian).
10. Zhurakovskiy V. P. *Otsenka prokhodimosti i vrednogo vozdeystviya na pochvu mnogoosnoy kole-snoy mashiny. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Estimation of patency and harmful effects on the soil of a multi-axle wheeled vehicle. Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. Moscow, 1993. 15 p.
11. Fedorenchik A. S., German A. A., Protas P. A. *Lesnyye mashiny "Amkodor"* [Forest machines "Amkodor"]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 240 p.
12. GOST 26955-86. Agricultural machinery mobile. The norms of the impact of propulsion on the soil. Moscow, Gosudarstvennyy agropromyshlennyy komitet SSSR Publ., 1987. 8 p. (In Russian).
13. Ageykin Ya. S. *Prokhodimost' avtomobiley* [Passability of cars]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 232 p.
14. Ustinov V. V. Experimental studies of the resistance of the soil when the conical indenter is pressed. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forest engineering journal], 2016, no. 3, pp. 188–196 (In Russian).
15. Protas P. A., Misuno Yu. I. Investigation of pressure of the forwarder "AMKODOR 2661-01" wheeler on the base surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature management. Processing of renewable resources, 2017, no. 2, pp. 251–258 (In Russian).
16. Shkrum V. D. *Umen'sheniye ekologicheskogo ushcherba ot vozdeystviya kolesnykh trelevochnykh sistem na lesnuyu pochvu. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Reducing environmental damage from the impact of wheeled skidders on forest soil. Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. St. Petersburg, 2006. 20 p.

### Информация об авторах

**Мисуно Юлия Игоревна** – аспирант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

**Протас Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas77@rambler.ru

### Information about the authors

**Misuno Yuliya Igorevna** – PhD student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

**Protas Pavel Alexandrovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas77@rambler.ru

Поступила 18.03.2019