

№19 (4)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2022

Resources and Technology

№19 (4)

Сетевое издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 - 57768 от 18.04.2014.

Учредитель – ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет.

Адрес электронной почты журнала: rt@petrsu.ru. Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

Resources and Technology

№19 (4)

Mass media registration certificate #ФС77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: rt@petrsu.ru. Phone number: 8 (8142) 76-97-11.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Васильев Сергей Борисович (Россия) доктор технических наук, профессор, servas@psu.karelia.ru.

Заместитель главного редактора:

Колесников Геннадий Николаевич (Россия) доктор технических наук, профессор, kgn@psu.karelia.ru.

Тихонов Евгений Андриянович (Россия) кандидат технических наук, доцент, tihonov@psu.karelia.ru.

Редакционный совет:

Гаврилова Ольга Ивановна (Россия) доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ogavril@mail.ru.

Добрынина Оксана Леонидовна (Россия) Кандидат педагогических наук, доцент, oksdobr@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович (Россия) Доктор технических наук, профессор, silver73@inbox.ru.

Карвинен Сари (Финляндия) Магистр естественных наук, sari.karvinen@metla.fi.

Левин Валерий Михайлович (Мексика) Доктор физико-математических наук, профессор, vlevine@imp.mx.

Ледницкий Андрей Викентьевич (Республика Беларусь) Кандидат экономических наук, доцент, ledniz@inbox.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, mayu1964@mail.ru.

Мельник Пётр Григорьевич (Россия) Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, melnik_petr@bk.ru.

Саастамойнен Олли (Финляндия) Доктор наук, olli.saastamoinen@uef.fi.

Саливоник Александр Владимирович (Россия) Кандидат технических наук, salivonik@rambler.ru.

Сюнёв Владимир Сергеевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, sionnev@psu.karelia.ru.

Editorial staff:

Editor-in-chief:

Prof. Dr. Vasilyev, Sergey (Russia), servas@psu.karelia.ru.

Deputy editor:

Prof. Dr. Kolesnikov, Gennady (Russia), kgn@psu.karelia.ru.

Prof. Dr. Tikhonov, Eugeny (Russia), tihonov@psu.karelia.ru.

Editorial board:

Prof. Dr. Gavrilova, Olga I. (Russia), ogavril@mail.ru.

Dr. Dobrinina, Oksana (Russia), oksdobr@mail.ru.

Prof. Dr. Grigoryev, Igor (Russia), silver73@inbox.ru.

M. Sc. Karvinen, Sari (Finland), sari.karvinen@metla.fi.

Prof. Dr. Levin, Valery (Mexico), vlevine@imp.mx.

Prof. Dr. Lednitskij, Andrej (Belarus), ledniz@inbox.ru.

Prof. Dr. Manukovsky, Andrey (Russia), mayu1964@mail.ru.

Dr. Melnik, Petr (Russia), melnik_petr@bk.ru.

Prof. Emeritus, Dr. Sc., Saastamoinen Olli (Finland), olli.saastamoinen@uef.fi.

Prof. Dr. Salivonik, Alexander (Russia), salivonik@rambler.ru.

Prof. Dr. Syunnev, Vladimir (Russia), sionnev@psu.karelia.ru.

Содержание №4, Т. 19, 2022

<i>Васильев В. В.</i>	Расчет транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплошной единицы	1 - 22
<i>Платонов А. А., Платонова М. А.</i>	Математическое моделирование оценки степени покрытия растительностью территорий инфраструктурных объектов	23 - 41
<i>Гнусов М. А., Драпалюк М. В., Попиков П. И., Дручинин Д. Ю., Бухтояров Л. Д., Ступников Д. С.</i>	Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтометом методами оптического распознавания и оптического измерения	42 - 63
<i>До Т., Григорьев Г. В., Каляшов В. А., Новгородов Д. В., Григорьева О. И., Хитров Е. Г.</i>	Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах	64 - 84
<i>Вычерова Н. Р., Будевич Е. А., Беляев А. Э.</i>	РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	85 - 101
<i>Ковалев Р. Н., Еналеева - Бандура И. М., Баранов А. Н., Григорьева О. И., Григорьев И. В.</i>	Математическая модель определения общей стоимости ресурсов лесных земель с учётом уровня развития лесотранспортной сети	102 - 117

Content №4, Vol. 19, 2022

<i>Vasiliev V. V.</i>	Calculation of transportation and operation indicators of an improved flat raft unit	1 - 22
<i>Platonov A. A., Platonova M. A.</i>	Mathematical modeling of the assessment of the degree of vegetation coverage of the territories of infrastructure facilities	23 - 41
<i>Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Druchinin D. Y., Bukhtoyarov L. D., Stupnikov D. S.</i>	Determination of the characteristics of the soil flow formed by a forest fire truck using optical recognition and optical measurement methods	42 - 63
<i>Do T., Grigorev G., Kalyashov V., Novgorodov D., Grigoreva O., Hitrov E.</i>	Methodology and results of experimental studies of the impact of forest machines with a tracked mover on the soils of slopes	64 - 84
<i>Vycherova N. R., Budevich E. A., Belyaev A. E.</i>	DEVELOPMENT OF A FOREST EARLY DETECTION SYSTEM FIRES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE	85 - 101
<i>Kovalev R., Enaleeva - Bandura I., Baranov A., Grigoreva O., Grigorev I.</i>	Mathematical model for determining the total cost of forest land resources taking into account the level of development of the forest transport network	102 - 117

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365

УДК 630*378.33

Статья

Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплотовочной единицы

Васильев Владимир Викторович

кандидат технических наук, Филиал АО «УК ЭФКО» в г. Алексеевке (Российская Федерация), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Получена: 26 апреля 2022 / Принята: 17 октября 2022 / Опубликована: 8 ноября 2022

Аннотация: Реализация транспортировки древесины по водным объектам Российской Федерации специализированными транспортно-технологическими схемами, функционирующими на базе плоских сплотовочных единиц, требует совершенствования данных сплотовочных единиц по направлению сокращения затрат на их изготовление. Рассмотрена усовершенствованная плоская сплотовочная единица, приспособленная к сплотовке в специальной сплотовочной машине. Конструктивной особенностью сплотовочной единицы является соединение гибкими связями рядов круглых лесоматериалов, уложенных перпендикулярно друг другу, с обязательной фиксацией между собой крайних круглых лесоматериалов первого (нижнего) и третьего рядов, а также второго и четвёртого рядов с помощью скоб. Это даёт возможность снизить затраты на изготовление плоской сплотовочной единицы с обеспечением высокой жёсткости, а следовательно, и волноустойчивости конструкции. Для осуществления планирования сплава древесины в плоских сплотовочных единицах и обеспечения дальнейшего безопасного выполнения сплавных работ предложена методика расчёта основных транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной сплотовочной единицы. В приведённой методике представлен расчёт габаритных размеров сплотовочной единицы, объёма содержания в ней древесины, коэффициента полнодревесности, коэффициента запаса плавучести, осадки, волноустойчивости, жёсткости, прочности, расхода сплотовочного такелажа. Каждый из этих показателей рассчитывается с учётом конструктивных особенностей усовершенствованной плоской сплотовочной единицы, габаритов сплавного хода, размера используемых круглых лесоматериалов, плотности сплавляемой древесины и всех внешних сил, действующих на сплотовочную единицу при её эксплуатации. Приведённые показатели обеспечивают плоскую сплотовочную единицу определёнными характеристиками, на основании которых

осуществляется первоначальное планирование транспортировки лесоматериалов по водным объектам и рассчитывается эффективность сплава древесины на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы. Выполнение сплава древесины на базе рассмотренной усовершенствованной плоской сплоточной единицы с предварительным расчётом её основных транспортно-эксплуатационных показателей по представленной методике даст возможность ввести в эксплуатацию малые и средние реки, обеспечив этим выполнение полного цикла поставок древесины потребителям водным транспортом.

Ключевые слова: круглые лесоматериалы; плоская сплоточная единица; габаритные размеры; объём; коэффициент полнодревесности; коэффициент запаса плавучести; осадка; волноустойчивость; жёсткость; прочность; расход сплоточного такелажа

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365

Article

Calculation of transportation and operation indicators of an improved flat raft unit

Vladimir Vasiliev

*Ph. D. in engineering, Branch of JSC «UK EFKO» in Alekseevka
(Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Received: 26 April 2022 / Accepted: 17 October 2022 / Published: 8 November 2022

Abstract: The implementation of the transportation of wood through the water bodies of the Russian Federation by specialized transport and technological schemes operating on the basis of flat units requires reducing the cost of their manufacture. An improved flat raft unit manufactured in a special bundling machine is considered. A proposed flat raft design features the connection of round timber rows laid perpendicular to each other with flexible links. The extreme logs of the first (lower) and third rows, as well as the second and fourth rows must be fastened with clamps. This allows reducing the cost of manufacturing a flat raft unit with high rigidity, and consequently, the raft wave resistance of the structure. The authors propose a method for calculating the main transport and operational indicators of an improved raft unit that will ensure water logging planning in flat raft units and its safe practicing. They present the calculation of the overall dimensions of the flat raft unit, its wood content volume, stacking factor, buoyancy coefficient, coefficients of draft, wave resistance, stiffness, strength, and floating implements expenditure. Each of these indicators is calculated taking into account the design features of the improved flat raft unit, its external dimensions, the size of the round timber used, floating wood density and all external forces acting on the raft unit during its operation. These indicators allow the initial planning of timber transportation through water bodies and the efficiency of wood rafting is calculated on the basis of an improved flat raft unit. Wood rafting based on the proposed improved flat raft unit with a preliminary calculation of its main transportation and operation indicators according to the presented methodology will make it possible to put small and medium-sized rivers into operation, thereby ensuring the implementation of a full cycle of wood supplies to consumers by water transportation.

Keywords: round timber; flat raft unit; overall dimensions; volume; full-wood ratio; buoyancy reserve coefficient; draft; wave resistance; stiffness; strength; floating implements expenditure

1. Введение

Современное развитие водного транспорта лесоматериалов на территории Российской Федерации должно осуществляться на опыте проведения сплавных работ, как на территории страны, так и за рубежом, с учётом всех требований [1], [2], предъявляемых при эксплуатации различных видов водных объектов. Многолетний опыт проведения сплавных работ показал [2—11], что на первоначальном сплаве древесины рационально использовать различного рода сплоточные единицы, обладающие малой осадкой и высоким содержанием древесины, которые способны транспортироваться самостоятельно, т. е. самосплавом, или в составе плота. Такими лесотранспортными единицами являются плоские сплоточные единицы. На магистральном сплаве древесины целесообразно осуществлять сплав лесоматериалов [2], [5], [7—9], [12—23] в крупногабаритных плотах или выполнять транспортировку лесоматериалов на баржах и судах. При этом первоначальный и магистральный сплав древесины строго должен осуществляться посредством транспортно-технологических схем, разработанных с учётом особенностей используемых сплоточных единиц.

Для выполнения транспортировки древесины на базе плоских сплоточных единиц были разработаны современные специализированные транспортно-технологические схемы [24—28], которые предусматривают все особенности транспортировки лесоматериалов не только на малых и средних реках, но и на больших и крупных водных объектах. Каждая транспортно-технологическая схема включает определённый вариант сплава лесоматериалов на первоначальном сплаве древесины. Первый вариант — это сплав лесоматериалов в плоских сплоточных единицах по несудоходным рекам самосплавом, до переформировочного или погрузочного рейда. Второй вариант — это сплав лесоматериалов в линейках, сформированных из плоских сплоточных единиц, по судоходным рекам за тягой буксировщика, до переформировочного рейда. В каждом варианте предусматривается обязательное использование плоских сплоточных единиц, конструкции которых приспособлены к машинной сборке и разборке.

Проведённый анализ всех существующих плоских сплоточных единиц показал [29], что данные сплоточные единицы имеют общий недостаток — конструктивные особенности этих сплоточных единиц не позволяют осуществлять их изготовление в сплоточных машинах. Приведённый фактор препятствует применению разработанных транспортно-технологических схем как базовых на водном транспорте древесины. В результате этого внедрение транспортно-технологических схем, функционирующих на базе плоских сплоточных единиц, ограничено и требует совершенствования существующих плоских сплоточных единиц в плане их приспособленности к изготовлению в сплоточных машинах. На основании вышесказанного определена цель работы: усовершенствовать конструкцию плоской сплоточной единицы для обеспечения возможности машинной сборки, а также

разработать методику расчёта основных транспортно-эксплуатационных показателей данной сплоточной единицы.

2. Материалы и методы

На базе прототипа — плоской сплоточной единицы, выполненной по типу безбабочной клетки, разработана усовершенствованная плоская сплоточная единица, представленная на рисунке 1 [30], которая содержит ряды 1—4 круглых лесоматериалов, уложенных в разнокомелицу, причём круглые лесоматериалы второго 2 и четвёртого 4 рядов уложены перпендикулярно лесоматериалам первого (нижнего) 1 и третьего 3 рядов. Первый 1 и третий 3 ряды круглых лесоматериалов соединены между собой гибкими связями 5, второй 2 и четвёртый 4 ряды круглых лесоматериалов соединены между собой гибкими связями 6, расположеными перпендикулярно гибким связям 5, соединяющим первый 1 и третий 3 ряды круглых лесоматериалов. Гибкие связи 5 оснащены соединительными устройствами 7, а гибкие связи 6 — соединительными устройствами 8.

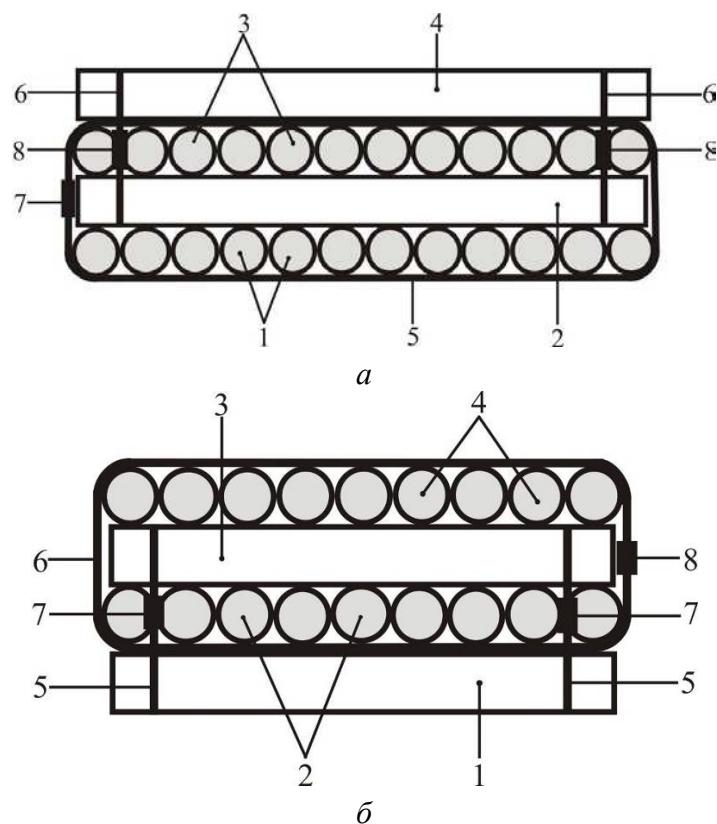


Рисунок 1. Усовершенствованная плоская сплоточная единица [30]: **а** — вид спереди; **б** — вид сбоку

Figure 1. Improved flat raft unit [30]: (a) front view; (b) side view

Для повышения жёсткости, а следовательно, и волноустойчивости плоской сплотовочной единицы, изображённой на рисунке 1, была проведена модернизация данной сплотовочной единицы, в результате этого получена новая конструкция усовершенствованной плоской сплотовочной единицы, которая приведена на рисунке 2.

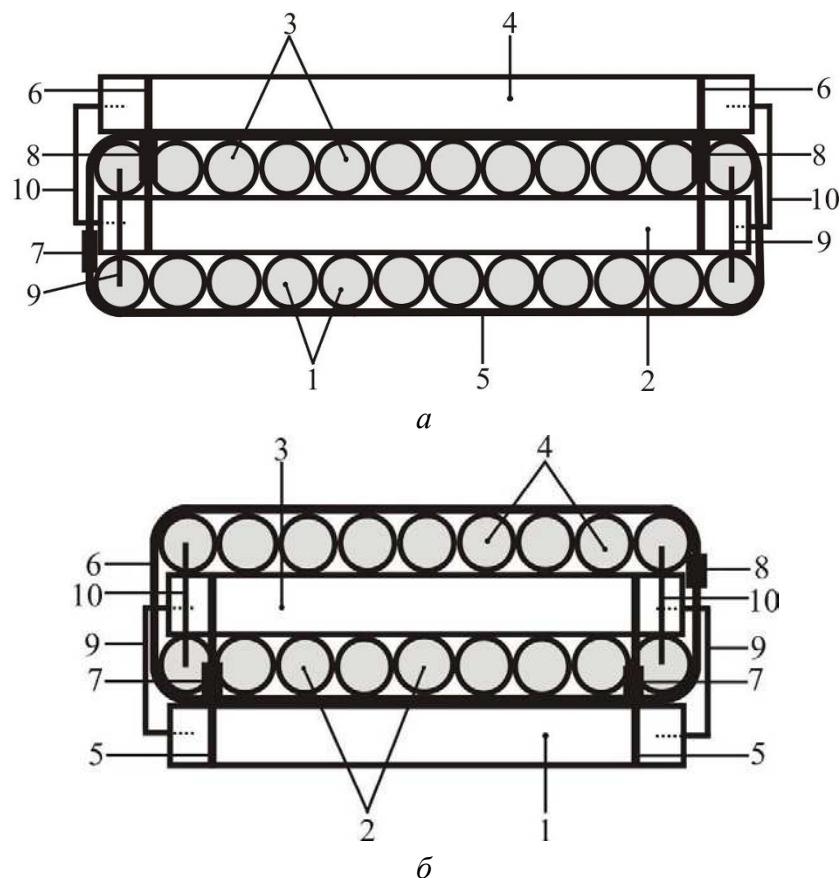


Рисунок 2. Усовершенствованная плоская сплотовочная единица: *а* — вид спереди; *б* — вид сбоку

Figure 2. Improved flat raft unit: (a) front view; (b) side view

Усовершенствованная плоская сплотовочная единица включает ряды 1—4 круглых лесоматериалов, уложенных в разнокомелицу, причём круглые лесоматериалы второго 2 и четвёртого 4 рядов уложены перпендикулярно лесоматериалам первого (нижнего) 1 и третьего 3 рядов. Первый 1 и третий 3 ряды круглых лесоматериалов соединены между собой гибкими связями 5, второй 2 и четвёртый 4 ряды круглых лесоматериалов соединены между собой гибкими связями 6, расположенными перпендикулярно гибким связям 5, соединяющим первый 1 и третий 3 ряды круглых лесоматериалов. Гибкие связи 5 оснащены соединительными устройствами 7, а гибкие связи 6 — соединительными устройствами 8. Крайние круглые лесоматериалы первого (нижнего) 1 и третьего 3 рядов соединены между

собой скобами 9, а крайние круглые лесоматериалы второго 2 и четвёртого 4 рядов соединены между собой с помощью скоб 10.

Конструктивные особенности плоской сплоточной единицы, изображённой на рисунке 2, позволяют осуществлять её изготовление в специальных сплоточных машинах с минимальными трудовыми и финансовыми затратами. При этом практическая эксплуатация данной сплоточной единицы требует от конструкции не только обеспечения высокой жёсткости и волноустойчивости, но и другие ключевые транспортно-эксплуатационные показатели, которые будут обеспечивать безаварийную транспортировку лесоматериалов в рассматриваемой сплоточной единице.

Обоснование методики расчёта основных транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплоточной единицы основывается на методах теоретического исследования.

3. Результаты

Основными транспортно-эксплуатационными показателями плоской сплоточной единицы, представленной на рисунке 2, являются: габаритные размеры, объём содержания древесины, коэффициент полнодревесности, коэффициент запаса плавучести, осадка, волноустойчивость, жёсткость, прочность и расход сплоточного такелажа. Каждый из приведённых показателей обеспечивает плоской сплоточной единице определённый уровень надёжности при сплаве данной сплоточной единицы самосплавом или в составе плota, а также при перемещении её на береговых складах, на переформировочных и погрузочных рейдах и рейдах приплыва.

Габаритные размеры плоской сплоточной единицы определяются тремя показателями, а именно: длиной $L_{ПСЕ}$, шириной $B_{ПСЕ}$ и высотой $H_{ПСЕ}$. Длина плоской сплоточной единицы $L_{ПСЕ}$ будет равна длине круглых лесоматериалов, уложенных в первом (нижнем) 1 ряду или третьем 3 ряду. В свою очередь, ширина плоской сплоточной единицы $B_{ПСЕ}$ регламентируется двумя условиями. Если плоская сплоточная единица сплавляется самосплавом, то её ширина будет равна:

$$B_{ПСЕ} = \sqrt{(b_{\min, LX} - C_{Ш})^2 - L_{ПСЕ}^2}, \quad (1)$$

где $b_{\min, LX}$ — минимальная ширина сплавного хода, м; $C_{Ш}$ — запас для безопасного сплава сплоточных единиц, равный 2—3 м [16].

При условии сплава плоской сплоточной единицы в составе плota её ширина $B_{ПСЕ}$ будет определяться транспортно-эксплуатационными показателями (габаритные размеры) малогабаритных плотов (линеек), предназначенных для сплава по малым и средним рекам. Также ширина сплоточной единицы может устанавливаться произвольно, но она не должна превышать расчётную максимально допустимую ширину линейки, определяемую для рассматриваемого водного объекта.

Высоту плоской сплоточной единицы $H_{ПСЕ}$ рекомендуется [17] определять из выражения

$$H_{ПСЕ} = \frac{T_{ПСЕ} \rho_B}{\rho_{Д} + \rho_{ПМК} k_{ПМ} + \rho_{ОПМ} k_{ОП}}, \quad (2)$$

где $T_{ПСЕ}$ — допустимая осадка плоской сплоточной единицы, м; ρ_B — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{Д}$ — плотность древесины, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ПМК}$ — плотность лесоматериалов повышенной плавучести, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k_{ПМ}$ — коэффициент учёта процентного соотношения древесины повышенной плавучести в сплоточной единице; $\rho_{ОПМ}$ — плотность лесоматериалов ограниченной плавучести, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k_{ОП}$ — коэффициент учёта процентного соотношения древесины ограниченной плавучести в сплоточной единице.

При этом допустимая осада плоской сплоточной единицы определяется из выражения [16]

$$T_{ПСЕ} = h_{\min, ПХ} - Z_{Д}, \quad (3)$$

где $h_{\min, ПХ}$ — минимальная глубина сплавного хода, м; $Z_{Д}$ — донный запас, равный 0,2—0,3 м [16].

Так как наиболее правильно выполнять укладку рядов круглых лесоматериалов таким образом, чтобы в каждом ряду присутствовали сортименты одинакового диаметра в верхнем отрезе, то высоту плоской сплоточной единицы наиболее точно можно определить следующим образом:

$$H_{ПСЕ} = \sum_{i=1}^n d_{iC}, \quad (4)$$

где d_{iC} — диаметр в нижнем отрезе применяемого сортимента i -го ряда, м.

Используя выражения (2)–(4), можно определить количество укладываемых рядов круглых лесоматериалов с определённым диаметром и плотностью древесины в плоскую сплоточную единицу, чтобы обеспечить безопасное выполнение сплавных работ.

Объём плоской сплоточной единицы определяется из выражения

$$V_{ПСЕ} = L_{ПСЕ} B_{ПСЕ} H_{ПСЕ} K_{ППСЕ}, \quad (5)$$

где $K_{ППСЕ}$ — коэффициент полнодревесности плоской сплоточной единицы.

Анализируя выражение (5), можно сделать однозначный вывод, что объём плоской сплоточной единицы зависит не только от её габаритных размеров, но и от коэффициента полнодревесности.

Коэффициент полнодревесности определяется по формуле

$$K_{ППСЕ} = \frac{V_{ДПСЕ}}{V_{ГПСЕ}}, \quad (6)$$

где $V_{ДПСЕ}$ — объём древесины в плоской сплоточной единице, м^3 ; $V_{ГПСЕ}$ — геометрический объём плоской сплоточной единицы, м^3 .

Объём древесины в плоской сплотовой единице равен:

$$V_{\text{ДПСЕ}} = \sum_{i=1}^n V_{iC}, \quad (7)$$

где V_{iC} — объём i -го сортимента в плоской сплотовой единице, м^3 .

Геометрический объём плоской сплотовой единицы составит:

$$V_{\text{ППСЕ}} = L_{\text{ПСЕ}} B_{\text{ПСЕ}} H_{\text{ПСЕ}}. \quad (8)$$

Из выражений (6)–(8) видно, что чем больше древесины в плоской сплотовой единице, тем больше коэффициент полнодревесности. При этом коэффициент полнодревесности не может быть больше единицы, т. е. $K_{\text{ППСЕ}} \leq 1$, в практических условиях он определяется экспериментальным путём.

Коэффициент запаса плавучести определяет ряд показателей, основным из которых является продолжительность нахождения плоской сплотовой единицы на плаву. Данный показатель является основным при установлении наиболее оптимальной начальной средневзвешенной плотности плоской сплотовой единицы перед спуском её на воду, чтобы она оставалась на плаву на всём протяжении запланированной транспортировки. Таким образом, согласно исследованию [2], коэффициент запаса плавучести $K_{3П}$ составляет:

$$K_{3П} = 1 - \frac{\rho_{\text{СВПСЕ}}}{\rho_B}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{СВПСЕ}}$ — средневзвешенная плотность плоской сплотовой единицы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Используя методику определения коэффициента запаса плавучести, приведённую в источнике [2], которая учитывает вес плоской сплотовой единицы и архимедову силу, получим коэффициент запаса плавучести сплотовой единицы после спуска её на воду, т. е. в первоначальный момент времени. Конечная формула расчёта коэффициента запаса плавучести плоской сплотовой единицы будет иметь следующий вид:

$$K_{3П} = 1 - \frac{V_{\text{ППК}} \rho_{\text{ППК}} + V_{\text{ОПК}} \rho_{\text{ОПК}} + m_{ct}}{V_{\text{ОПСЕ}} \rho_B}, \quad (10)$$

где $V_{\text{ППК}}$ — объём лесоматериалов повышенной плавучести с учётом коры, м^3 ; $V_{\text{ОПК}}$ — объём лесоматериалов ограниченной плавучести с учётом коры, м^3 ; m_{ct} — масса сплотового такелажа, кг; $V_{\text{ОПСЕ}}$ — общий объём плоской сплотовой единицы, включающий объём древесины и коры круглых лесоматериалов повышенной плавучести и ограниченной плавучести, а также объём сплотового такелажа, м^3 .

Так как с течением времени древесина, находящаяся в плоской сплотовой единице, при контакте с водой будет увеличивать свою плотность, то коэффициент запаса плавучести будет уменьшаться. На основании сказанного и с учётом данных, приведённых в работе [2], коэффициент запаса плавучести плоской сплотовой единицы в конкретный период времени рассчитывается по формуле

$$K_{3\pi} = 1 - \frac{V_{\text{ППК}} (\rho_{\text{ППК}} + b_{\text{ПСИП}} t_H) + V_{\text{ОПК}} (\rho_{\text{ОПК}} + b_{\text{ОСИП}} t_H) + m_{\text{CT}}}{V_{\text{ОПСЕ}} \rho_B}, \quad (11)$$

где $b_{\text{ПСИП}}$ — средняя интенсивность поглощения жидкости лесоматериалами повышенной плавучести, кг/(м³·сутки); $b_{\text{ОСИП}}$ — средняя интенсивность поглощения жидкости лесоматериалами ограниченной плавучести, кг/(м³·сутки); t_H — время намокания, сут.

Учитывая зависимость (11) и методику определения осадки плоских сплоточных единиц, которая приведена в работах [2], [8—10], [11], запишем формулу расчёта осадки плоской сплоточной единицы в конкретный период времени:

$$T_{\text{ПСЕ}} = \frac{V_{\text{ППК}} (\rho_{\text{ППК}} + b_{\text{ПСИП}} t_H) + V_{\text{ОПК}} (\rho_{\text{ОПК}} + b_{\text{ОСИП}} t_H) + m_{\text{CT}}}{L_{\text{ПСЕ}} B_{\text{ПСЕ}} \rho_B K_{\text{ППСЕ}}}. \quad (12)$$

Если плоская сплоточная единица собирается только из круглых лесоматериалов одинаковой плотности, то равенство (12) запишется следующим образом:

$$T_{\text{ПСЕ}} = \frac{V_{\text{ДПСЕ}} (\rho_{\text{ДПСЕ}} + b_{\text{ДПСЕ}} t_H) + m_{\text{CT}}}{L_{\text{ПСЕ}} B_{\text{ПСЕ}} \rho_B K_{\text{ППСЕ}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{ДПСЕ}}$ — общий объём древесины с корой в плоской сплоточной единице, м³; $\rho_{\text{ДПСЕ}}$ — средняя плотность древесины в плоской сплоточной единице, кг/м³; $b_{\text{ДПСЕ}}$ — средняя интенсивность поглощения жидкости древесиной в плоской сплоточной единице, кг/(м³/сут.).

Преобразуем зависимость (13), выразим максимальное время намокания плоской сплоточной единицы до момента потери плавучести, т. е. максимальное время нахождения лесотранспортной единицы в воде:

$$t_{H \text{ max}} = \frac{T_{\text{ПСЕ}} L_{\text{ПСЕ}} B_{\text{ПСЕ}} \rho_B K_{\text{ППСЕ}} - V_{\text{ДПСЕ}} \rho_{\text{ДПСЕ}} - m_{\text{CT}}}{V_{\text{ДПСЕ}} b_{\text{ДПСЕ}}}. \quad (14)$$

Волноустойчивость — это способность плоской сплоточной единицы противостоять выплыvанию отдельных круглых лесоматериалов или разрушению при транспортировке на волнении. Также волноустойчивость плоской сплоточной единицы обусловливается жёсткостью конструкции. Волноустойчивость рассматриваемой плоской сплоточной единицы зависит от трёх условий, а именно: от плотности укладки в рядах круглых лесоматериалов, силы прижатия рядов друг к другу при натягивании и соединении обвязок, а также от качества крепления между собой крайних круглых лесоматериалов в рядах. Таким образом, для обеспечения волноустойчивости сплоточной единицы необходимо укладывать круглые лесоматериалы в разнокомлицу с одинаковым диаметром в верхнем отрезе или с допустимым диапазоном варьирования диаметра круглых лесоматериалов, который устанавливается экспериментальным путём. При этом прижатие рядов друг к другу обязательно выполняется в специализированной сплоточной машине, разработанной для

сплотки рассматриваемой сплотовочной единицы. Соединение между собой крайних круглых лесоматериалов первого (нижнего) 1 и третьего 3 рядов и крайних круглых лесоматериалов второго 2 и четвёртого 4 рядов необходимо осуществлять с помощью скоб оптимального поперечного сечения, которые забиваются в торцы соединяющихся лесоматериалов. В качестве скоб могут использоваться брус или железная пластина, которые закрепляются к торцам лесоматериалов гвоздями или саморезами.

Прочность плоской сплотовочной единицы зависит от прочности используемого сплотовочного такелажа, т. е. от прочности гибких связей. Определяем, что расчёт на прочность гибких связей будет осуществляться при возникновении в них продольной растягивающей силы. При этом все изгибающие моменты, возникающие в сплотовочном такелаже, а также растягивающую силу из-за собственного веса, выразим через коэффициент k_{PGC} . Так как планируется поднимать и опускать сплотовочную единицу при спуске её на воду и выгрузке из воды, а также при транспортировке за гибкие связи, то сила растяжения, действующая на сплотовочный такелаж P_{CPCT} , будет складываться из силы распора, т. е. из веса сплотовочной единицы G_{PCE} . На основании вышесказанного и с учётом основных условий прочности [31—40], которые справедливы для всех видов материала, запишем условие прочности гибких связей

$$\sigma_{\max IC} = \frac{N_{\max IC}}{F_{IC}} \leq [\sigma_p], \quad (15)$$

где $\sigma_{\max GC}$ — максимальное напряжение, возникающее в поперечном сечении гибкой связи, Па; $N_{\max GC}$ — максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении гибкой связи, Н; F_{GC} — площадь поперечного сечения гибкой связи, м^2 ; $[\sigma_p]$ — допускаемое напряжение при растяжении, Па.

Площадь поперечного сечения гибкой связи F_{JC} из условия (15) равна:

$$F_{RC} = \frac{N_{\max RC}}{\left[\sigma_p \right]}. \quad (16)$$

В зависимости (16) допустимое напряжение при растяжении $[\sigma_p]$ для гибких связей рассчитывается по формуле

$$[\sigma_P] = \frac{\sigma_{Pnp\partial}}{[k_{3\pi\pi}] k_{\pi\Gamma C}}, \quad (17)$$

где $\sigma_{p_{npo}}$ — предельно допускаемое напряжение при растяжении, Па; $[k_{3PP}]$ — коэффициент запаса прочности при растяжении; k_{nrg} — понижающий коэффициент для гибкой связи.

Для данных условий коэффициент запаса прочности $[k_{3ПР}]$ для проволоки следует принимать 3 [16]. Понижающий коэффициент $k_{ПГС}$ для гибкой связи данной плоской сплотовочной единицы устанавливается 1,5—2,0.

Максимальная продольная растягивающая сила $N_{\max IC}$ рассчитывается по формуле

$$N_{\max IC} = P_{CPCT} = 0,5G_{PCE}. \quad (18)$$

В равенстве (18) вес плоской сплотовочной единице равен:

$$G_{PCE} = g(V_{ППК}\rho_{ППК} + V_{ОПК}\rho_{ОПК} + m_{CT}), \quad (19)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; $V_{ППК}$ — объём лесоматериалов повышенной плавучести с учётом коры, м^3 ; $\rho_{ППК}$ — плотность лесоматериалов повышенной плавучести, кг/м^3 ; $V_{ОПК}$ — объём лесоматериалов ограниченной плавучести с учётом коры, м^3 ; $\rho_{ОПК}$ — плотность лесоматериалов ограниченной плавучести, кг/м^3 ; m_{CT} — масса сплотовочного такелажа, кг.

Так как гибкая связь может представлять собой трос единой структуры, т. е. трос из одной проволоки, стальные проволочные канаты или тросы и канаты, изготовленные из полимерных материалов [41], то расчёт площади поперечного сечения гибкой связи, с учётом рекомендаций работы [42], выполняется по формуле

$$F_{IC} = z_{PCE} \frac{\pi d_{PCE}^2}{4}, \quad (20)$$

где z_{PCE} — число проволоки в гибкой связи; π — число пи, постоянное, приблизительно равное 3,14; d_{PCE} — диаметр одной проволоки в гибкой связи, м.

В зависимости (20) диаметр одной проволоки в гибкой связи d_{PCE} будет равен диаметру гибкой связи d_{IC} , тогда когда гибкая связь будет представлять единую структуру в поперечном сечении, т. е. состоять, например, из одной проволоки с отсутствием пустот в поперечном сечении.

Подставив зависимости (18)–(20) в равенство (17), при этом сделав ряд преобразований, выражим минимальный допустимый диаметр проволоки в гибкой связи, который будет равен:

$$d_{\min PCE} = \sqrt{\frac{2[k_{3PP}]k_{PCE}G_{PCE}}{\pi z_{PCE}\sigma_{Pnр\partial}}}. \quad (21)$$

Из равенства (21) минимальный допустимый диаметр гибкой связи составит:

$$d_{\min IC} = \sqrt{\frac{2[k_{3PP}]k_{PCE}G_{PCE}}{\pi\sigma_{Pnр\partial}}}. \quad (22)$$

Зависимости (21) и (22) справедливы для гибкой связи, которая соединяет между собой второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, т. к. при поднятии плоской сплотовочной единицы она воспринимает основную нагрузку от её веса. В свою очередь, гибкая связь, соединяющая первый и третий ряды круглых лесоматериалов, при поднятии сплотовочной единицы будет воспринимать нагрузку только от веса первого (нижнего) ряда круглых

лесоматериалов. Таким образом, минимальный допустимый диаметр проволоки в гибкой связи и минимальный допустимый диаметр гибкой связи рассчитываются соответственно по формулам:

$$d_{\min_{\text{ПГС}}} = \sqrt{\frac{2[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{РКЛ}}}{\pi z_{\text{ПГС}}\sigma_{P_{npd}}}}; \quad (23)$$

$$d_{\min_{\text{ПГС}}} = \sqrt{\frac{2[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{РКЛ}}}{\pi\sigma_{P_{npd}}}}, \quad (24)$$

где $G_{\text{РКЛ}}$ — вес первого (нижнего) ряда круглых лесоматериалов, Н.

Если известно, что первый (нижний) ряд собирается из круглых лесоматериалов определённого диаметра, следовательно, зная длину сортиментов и их диаметр в верхнем отрезе, можно определить объём каждого круглого лесоматериала, то вес первого (нижнего) ряда можно рассчитать по формуле

$$G_{\text{РКЛ}} = g\rho_{\text{д}} \sum_{i=1}^n V_{i\text{СРКЛ}}, \quad (25)$$

где $\rho_{\text{д}}$ — плотность древесины первого ряда, кг/м³; $V_{i\text{СРКЛ}}$ — объём i -го сортимента в первом (нижнем) ряду плоской сплошной единицы, м³.

В практических условиях гибкая связь может представлять собой сложную структуру в попечном сечении, т. е. состоять из нескольких сплетённых материалов, в т. ч. и полимерных. Следовательно, подбор гибких связей, соединяющих между собой второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, с учётом рекомендаций работы [16], необходимо выполнять согласно условию

$$0,5[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{ПСЕ}} \leq P_{\text{днГС}}, \quad (26)$$

где $P_{\text{днГС}}$ — допускаемая нагрузка для применяемого вида гибкой связи, Н.

В свою очередь, подбор гибких связей, соединяющих первый и третий ряды круглых лесоматериалов, следует выполнять по условию

$$0,5[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{РКЛ}} \leq P_{\text{днГС}}. \quad (27)$$

Концы гибких связей фиксируются соединительными устройствами. Подбор соединительных устройств для гибких связей, соединяющих между собой второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов и первый и третий ряды круглых лесоматериалов, следует осуществлять по неравенствам соответственно:

$$0,5[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{ПСЕ}} \leq P_{\text{днСУ}}; \quad (28)$$

$$0,5[k_{3\text{ПР}}]k_{\text{ПГС}}G_{\text{РКЛ}} \leq P_{\text{днСУ}}, \quad (29)$$

где $P_{днсу}$ — допускаемая нагрузка для соединительных устройств, Н.

Сплоточный такелаж для данной плоской сплоточной единицы: цепные комплекты или обвязочные комплекты, которые рекомендуется применять при сплотке пучков [15]. Таким образом, изготовление плоской сплоточной единицы, в случае использования в качестве сплоточного такелажа цепных или обвязочных комплектов для соединения между собой второго и четвёртого рядов круглых лесоматериалов, первого и третьего рядов круглых лесоматериалов, выполняется по неравенствам соответственно:

$$0,5[k_{3pp}]k_{ppc}G_{pce} \leq P_{днцо}; \quad (30)$$

$$0,5[k_{3pp}]k_{ppc}G_{pkp} \leq P_{днцо}, \quad (31)$$

где $P_{днцо}$ — допускаемая нагрузка для цепных или обвязочных комплектов, Н.

Так как цепные и обвязочные комплекты имеют в своей конструкции цепи, то в неравенствах (30), (31) коэффициент $[k_{3pp}] = 4$ [16].

Расход сплоточного такелажа, а именно потребная длина четырёх гибких связей, две из которых соединяют первый и третий ряды круглых лесоматериалов, а остальные две — второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, зависит от высоты H_{pce} , длины L_{pce} и ширины B_{pce} плоской сплоточной единицы.

Длина гибких связей, соединяющих первый и третий ряды круглых лесоматериалов, при условии, что все ряды круглых лесоматериалов собираются из сортиментов одного диаметра, определяется из выражения

$$L_{rc123} = n_{rc123} (L_{1rc123} (1 + m_{3rc})) = n_{rc123} \left(\left(\frac{3}{2} H_{pce} + 2B_{pce} \right) (1 + m_{3rc}) \right), \quad (32)$$

где n_{rc123} — число гибких связей, соединяющих первый и третий ряды круглых лесоматериалов; L_{1rc123} — длина одной гибкой связи, соединяющей первый и третий ряды круглых лесоматериалов, м; m_{3rc} — коэффициент запаса, принимается равным 0,08—0,10 [16].

В свою очередь, длина гибких связей, соединяющих второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, при условии, что все ряды круглых лесоматериалов собираются из сортиментов одного диаметра, рассчитывается по зависимости

$$L_{rc234} = n_{rc234} (L_{1rc234} (1 + m_{3rc})) = n_{rc234} \left(\left(\frac{3}{2} H_{pce} + 2L_{pce} \right) (1 + m_{3rc}) \right), \quad (33)$$

где n_{rc234} — число гибких связей, соединяющих второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов; L_{1rc234} — длина одной гибкой связи, соединяющей второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, м.

Если ряды круглых лесоматериалов собираются из сортиментов различного диаметра, т. е. каждый ряд имеет свой диаметр, то длина гибких обвязок, соединяющих первый

и третий ряды круглых лесоматериалов, и длина гибких обвязок, соединяющих второй и четвёртый ряды круглых лесоматериалов, определяются соответственно по формулам:

$$L_{TC123} = n_{TC123} (L_{1TC123} (1 + m_{3GC})) = n_{TC123} \left(\left(2 \sum_{i=1}^n d_{iCp} + 2B_{PCE} \right) (1 + m_{3GC}) \right); \quad (34)$$

$$L_{TC234} = n_{TC234} (L_{1TC234} (1 + m_{3GC})) = n_{TC234} \left(\left(2 \sum_{i=1}^n d_{iCp} + 2L_{PCE} \right) (1 + m_{3GC}) \right), \quad (35)$$

где d_{iCp} — средний диаметр круглых лесоматериалов i -го ряда, м.

Обоснование основных транспортно-эксплуатационных показателей плоской сплоточной единицы, изображённой на рисунке 2, по вышеизложенной методике даёт возможность определить требуемые показатели для организации эффективного сплава лесоматериалов по водным путям.

4. Обсуждение и заключение

Усовершенствованная конструкция плоской сплоточной единицы имеет определённые преимущества над существующими сплоточными единицами, которые дают возможность минимизировать затраты при её изготовлении. К основным преимуществам относятся следующие показатели: простата конструкции, возможность изготовления плоской сплоточной единицы в специализированных сплоточных машинах, высокие жёсткость и волноустойчивость конструкции. Приведённые преимущества формируются за счёт укладки рядов круглых лесоматериалов перпендикулярно друг другу с последующим соединением данных рядов гибкими связями и обязательной фиксации крайних круглых лесоматериалов первого (нижнего) и третьего рядов между собой, а также фиксации крайних круглых лесоматериалов второго и четвёртого рядов между собой с помощью специальных скоб.

Для стабильной и безаварийной эксплуатации усовершенствованной конструкции плоской сплоточной единицы в реальных условиях необходимо осуществлять расчёт её основных транспортно-эксплуатационных показателей. Предложена методика расчёта транспортно-эксплуатационных показателей сплоточной единицы, где акцент был поставлен на определение габаритных размеров, объёма содержания древесины, коэффициента полнодревесности, коэффициента запаса плавучести, осадки, прочности и расхода сплоточного такелажа. Каждый из приведённых показателей обеспечивает плоскую сплоточную единицу определёнными характеристиками, на основании которых осуществляется первоначальное планирование транспортировки лесоматериалов по водным объектам и рассчитывается эффективность сплава древесины на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы.

Крупномасштабное внедрение предложенной плоской сплоточной единицы на первоначальный сплав древесины, независимо от способа её транспортировки по водным

объектам, даст возможность возобновить сплав лесоматериалов по рекам с лимитирующими габаритами сплавного хода. В результате этого транспортировка древесины от мест заготовки к пунктам потребления будет осуществляться одним видом транспорта, а именно водным. Так как водный транспорт в настоящее время является наиболее рентабельным, то применение усовершенствованной плоской сплоточной единицы позволит снизить затраты на перевозки древесины из эксплуатационных лесов.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации: текст с последними изм. и доп. на 2022 г. М.: Эксмо, 2022. 64 с. (Законы и кодексы).
2. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов: монография.* Saarbrucken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
3. Патент 199681 Р. Ф., МПК B65G 69/00, 57/18. Сплоточная машина / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Позняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2020119839; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 5 с.
4. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B 63 B 35/00, 3/08, 7/02. Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau / demandeur Roumengas Jonsa Guy; Mandataire SCHMITT. No. 0502132; la date de la demande 03.03.05; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
5. *Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5), Austria, 2018. P. 765—772.*
6. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.*
7. *Митрофанов А. А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение.* Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.
8. *Васильев В. В. Модернизированный плот для рек с малыми глубинами // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 1. С. 45—58.*
9. *Васильев В. В., Гоптарев С. М., Афоничев Д. Н. Обоснование инерционных характеристик плотов со сплоточными единицами стабилизированной плавучести // Лесотехнический журнал ВГЛТА. 2014. Т. 4, № 2 (14). С. 110—115.*
10. *Васильев В. В. Особенности формирования осадки плоской сплоточной единицы // Лесотехнический журнал ВГЛТА. 2014. № 1 (13). С. 79—84.*
11. *Васильев В. В. Плоская сплоточная единица для первоначального и магистрального плотового сплава круглых лесоматериалов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы междунар. научно-технич. конф. / ВоГТУ. Вологда, 2015. С. 66—68.*
12. Brevet 1461583 FR, Int. Cl. B 63 b, B 65 g. Remorquage de billes de bois / société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publiée 02.10.1966. 4 p.

13. Brevet 1286734 FR, Int. CI. B 65 g. Procédé de flottage des bois en grumes et dispositif d'attache pour la mise en oeuvre de ce procédé / M. Roger Jandin résidant en France; la date de la demande 23.01.1961; la date de publication 29.01.1962. 4 p.
14. *Васильев В. В.* Анализ распространённых транспортно-технологических схем водного транспорта лесоматериалов // Научный журнал молодых учёных ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ». 2019. № 4 (17). С. 48—52.
15. *Овчинников М. М., Полищук В. П., Григорьев Г. В.* Транспорт леса: В 2 т. Т. 2. Лесосплав и судовые перевозки: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 208 с.
16. *Донской И. П.* Водный транспорт леса. М.: Гослесбумиздат, 1955. 332 с.
17. *Лебедев А. Н.* Водный транспорт леса. Л.: Гослестхиздат, 1939. 464 с.
18. Patent 57167892 JP, Int. CI. B 63 B 35/58, B 65 G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood / Kitai Toshiro; Kitai Tekkosho:kk. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
19. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B 63 b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force / Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. No. 10, 354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
20. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B 63 B 35/62. Cable hook / Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
21. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B 63 B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting / William A. Meighan, Portland, Oreg. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
22. Patent 3556319 USA, Int. CI. B 63 b 27/16. Log-bundling apparatus / M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
23. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B 63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs / Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, V0N 1VO, Canada. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
24. *Васильев В. В.* Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплоточных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
25. *Васильев В. В.* Усовершенствованная транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплоточных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 341—346.
26. *Васильев В. В.* Транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — плот // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 335—340.
27. *Васильев В. В., Аксенов И. И.* Транспортно-технологическая схема поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — баржа // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. г. Воронеж 24—25 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2020. С. 30—33.

28. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Особенности расчёта параметров погружочного рейда при использовании на сплаве плоских сплоточных единиц // Современные машины, оборудование и ИТ-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: Материалы Всерос. научно-практич. конф. г. Воронеж, 17 июня 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2021. С. 40—48. DOI: 10.34220/MMEITSIC2021_40-48.

29. Васильев В. В., Аксенов И. И. Анализ конструкций перспективных плоских сплоточных единиц // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции — новые технологии и техника нового поколения для АПК: Сб. науч. докл. XX междунар. научно-практич. конф. г. Тамбов, 26—27 сентября 2019 г. Тамбов: Изд-во «Студия печати Галины Золотовой», 2019. С. 188—191.

30. Патент 210485 Р. Ф., МПК В 63 В 35/62. Плоская сплоточная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова». № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, бюл. № 11. 5 с.

31. Belyayev N. M. Problems in strength of materials. Elsevier, 1966. 539 p.

32. Stephens R. C. Strength of materials. Theory and examples. Edward Arnold, 1970. 314 p.

33. Vitor Dias da Silva. Mechanics and strength of materials. Springer, 2006. 531 p.

34. Patnaik S., Hopkins D. Strength of aterials: a new unified theory for the 21st century. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.

35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. Advanced mechanics of materials. Wiley, 1993. 827 p.

36. Strength of Materials and Structures, Fourth Edition / Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. Arnold, 1999. 719 p.

37. Broutman L. Interfaces in composites. ASTM, 1968. 198 p.

38. Den Hartog J. P. Strength of materials. Dover Publications, 1961. 346 p.

39. Skalmierski B. Mechanics and strength of materials. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.

40. Komarovskiy A. A., Astakhov V. P. Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures. CRC Press, 2002. 629 p.

41. Липман Д. Н. Такелаж из полимеров: Обзор. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1975. 20 с.

42. Заводчиков Д. А. Грузоподъёмные машины. Второе изд., доп. и перераб. М.: Гос. научно-техн. изд-во «Машиностроительная литература», 1962. 312 с.

References

1. The Water Code of the Russian Federation: the text with the latest amendments and additions for 2022. Moscow, Eksmo, 2022. 64 p. (Laws and Codes). (In Russ).
2. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy: monograph*. Saarbrucken (Germany): Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ).
3. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A, Poznyakov E. V. Patent 199681 R. F., IPC B65G 69/00, 57/18. The Splotch machine. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov» (RU). No. 2020119839; application. 08.06.2020; publ. 14.09.2020, Bul. No. 26. 5 p. (In Russ.).

4. Patent 2882723 FR, Int. THIS.8 B 63 B 35/00, 3/08, 7/02. Modular boat for the transport of logs by water. Applicant Roumengas Jonsa Guy; Agent SCHMITT. No. 0502132; the date of application 03.03.05; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
5. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5)*. Austria, 2018, pp. 765—772.
6. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. The use of flat splice units on the initial timber alloy. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 1, pp. 128—142. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142. (In Russ.).
7. Mitrofanov A. A. *Lesosplav. New technologies, scientific and technical support*. Arkhangelsk, Publishing House of ASTU, 2007. 492 p. (In Russ.).
8. Vasiliev V. V. Modernized raft for rivers with shallow depths. *Vestnik PSTU. Series: Forest. Ecology. Environmental management PSTU*, 2015, no. 1, pp. 45—58. (In Russ.).
9. Vasiliev V. V., Goptarev S. M., Afonichev D. N. Substantiation of inertial characteristics of rafts with cohesive units of stabilized buoyancy. *Forestry Journal VGLTA*, 2014, vol. 4, no. 2 (14), pp. 110—115. (In Russ.).
10. Vasiliev V. V. Features of the formation of the precipitation of a flat flat unit. *Forestry journal VGLTA*, 2014, no. 1 (13), pp. 79—84. (In Russ.).
11. Vasiliev V. V. A flat cohesive unit for the initial and main raft alloy of round timber. *Actual problems of the development of the forest complex: mater. international Scientific and Technical conference*. VoGTU. Vologda, 2015, pp. 66—68. (In Russ.).
12. Brevet 1461583 FR, Int. CI. B 63 b, B 65 g. Remorquage de billes de bois. Société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publié 02.10.1966. 4 p.
13. Brevet 1286734 FR, Int. CI. B 65 g. Procédé de flottage des bois en grumes et dispositif d'attache pour la mise en oeuvre de ce procédé. M. Roger Jandin résidant en France; la date de la demandé 23.01.1961; la date de publié 29.01.1962. 4 p.
14. Vasiliev V. V. Analysis of common transport and technological schemes of water transport of timber. *Scientific Journal of Young scientists of the Oryol State Agrarian University*, 2019, no. 4 (17), pp. 48—52. (In Russ.).
15. Ovchinnikov M. M., Polishchuk V. P., Grigoriev G. V. *Forest transport*: In 2 t. T. 2. Timber and ship transportation: Textbook for students. higher. studies. institutions. Moscow, Publishing center «Academy», 2009. 208 p. (In Russ.).
16. Donskoy I. P. *Water transport of the forest*. Moscow, Goslesbumizdat, 1955. 332 p. (In Russ.).
17. Lebedev A. N. *Water transport of the forest*. Leningrad, Goslestehizdat, 1939. 464 p. (In Russ.).
18. Kitai Toshiro; Kitai Tekkosho:kk. Patent 57167892 JP, Int. CI. B 63 B 35/58, B 65 G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
19. Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B 63 b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force. No. 10,354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
20. Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B 63 B 35/62. Cable hook. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
21. William A. Meighan, Portland, Oreg. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B 63 B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
22. M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. Patent 3556319 USA, Int. CI. B 63 b 27/16. Log-bundling apparatus. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.

23. Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B 63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
24. Vasiliev V. V. Substantiation of the parameters of the transport and technological scheme for the supply of wood in flat raft units according to the raft (ruler) — raft principle. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48—78. doi: 10.15393/j2.art.2021.5603. (In Russ.).
25. Vasiliev V. V. Improved transport and technological scheme for the supply of wood by water transport in flat-flow units on the principle of raft (ruler) — raft. *Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: materials of international scientific practice. Online conferences; Voronezh, November 17—19, 2020*. Voronezh, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 2020, pp. 341—346. (In Russ.).
26. Vasiliev V. V. Transport and technological scheme of wood supply by water transport in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — raft. *Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: materials of international scientific practice. Online conferences. Voronezh, November 17—19, 2020*. Voronezh, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 2020, pp. 335—340. (In Russ.).
27. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Transport and technological scheme of timber supply to consumers in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — barge. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the international scientific and practical conference. Voronezh 24—25 November 2020*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 30—33. (In Russ.).
28. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Features of calculating the parameters of a loading raid when using flat raft units on an alloy. *Modern machines, equipment and IT solutions of the timber industry complex: theory and practice: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Voronezh, June 17, 2021*. Voronezh, FSBEI VO «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov», 2021, pp. 40—48. doi: 10.34220/MMEITSIC2021_40-48. (In Russ.).
29. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Analysis of the designs of promising flat cohesive units. *Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products — new technologies and equipment of a new generation for the agro-industrial complex: collection of scientific reports of the XX International Scientific and practical Conference. Tambov, September 26—27, 2019*. Tambov, Publishing House «Printing Studio Galina Zolotova», 2019, pp. 188—191. (In Russ.).
30. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 210485 RF, IPC B 63 B 35/62. Flat cohesive unit. Applicant and patent holder of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov. No. 2021125409; application 19.10.2020; publ. 18.04.2022, bul. No. 11. 5 p. (In Russ.).
31. Belyayev N. M. *Problems in strength of materials*. Elsevier, 1966. 539 p.
32. Stephens R. C. *Strength of materials. Theory and examples*. Edward Arnold, 1970. 314 p.
33. Vitor Dias da Silva. *Mechanics and strength of materials*. Springer, 2006. 531 p.
34. Patnaik S., Hopkins D. *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
36. Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. *Strength of Materials and Structures, Fourth Edition*. Arnold, 1999. 719 p.
37. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
38. Den Hartog J. P. *Strength of materials*. Dover Publications, 1961. 346 p.

39. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
40. Komarovsky A. A., Astakhov V. P. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
41. Lipman D. N. *Polymer rigging: review*. Moscow, Vnipplelesprom, 1975. 20 p. (In Russ.).
42. Breeders D. A. *Lifting machines: second edition supplemented and revised*. Moscow, State Scientific and Technical Publishing house machine-building literature, 1962. 312 p. (In Russ.).

© Васильев В. Б., 2022

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6383

УДК 630*36

Статья

Математическое моделирование оценки степени покрытия растительностью территорий инфраструктурных объектов

Платонов Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (Российская Федерация), paa7@rambler.ru

Платонова Марина Алексеевна

кандидат технических наук, Воронежский институт высоких технологий (Российская Федерация), m.platonova@vfrgups.ru

Получена: 28 апреля 2022 / Принята: 11 ноября 2022 / Опубликована: 15 ноября 2022

Аннотация: В рамках надлежащего содержания ряда линейных инфраструктурных объектов (полос отвода автомобильных и железных дорог, охранных зон линий электропередачи, трасс газо-, нефте- и продуктопроводов и иных) нередко на их территориях осуществляют удаление произрастающей нежелательной древесно-кустарниковой растительности. Авторами статьи было установлено, что при организации и проведении указанных работ не уделяется должного внимания вопросам оценки их качества. Существующие способы и методы оценки качества работ по удалению нежелательной растительности не обеспечивают объективного суждения об эффективности выполненных мероприятий по очистке территорий инфраструктурных объектов от указанной растительности, при этом в качестве оценочного критерия практически повсеместно используется показатель густоты произрастающей на площади в 1 га растительности. Выявлено, что данный показатель, определяемый с большой долей субъективности, не всегда способен адекватно оценить степень заражания обследуемой территории. Целью исследования являлась разработка математической модели оценки степени покрытия нежелательной древесно-кустарниковой растительностью территорий инфраструктурных объектов с обоснованием критерия, позволяющего оценить качество выполнения работ по удалению указанной растительности. Для реализации целей исследования авторами была разработана математическая модель, учитывающая предварительно выявляемые характеристики произрастающей растительности

(количество экземпляров, площадь проекций крон) и параметры обследуемой территории (площадь исследуемого участка и фактическая площадь, на которой произведено удаление растительности) и иные параметры. В качестве выходного показателя разработанной математической модели авторами предложено использовать критерий непроектного покрытия территорий нежелательной растительностью. В статье представлен пример оценки качества выполняемых мероприятий по удалению растительности с территории полосы отвода железных дорог для ряда исходных данных. Разработанный авторами критерий непроектного покрытия территорий линейных инфраструктурных объектов нежелательной древесно-кустарниковой растительностью может быть применён при организации работ по удалению указанной растительности для обоснования применения необходимой системы машин и механизмов, а также при оценке качества выполнения работ по очистке территорий инфраструктурных объектов от нежелательной растительности.

Ключевые слова: инфраструктурный объект; растительность; удаление; работа; оценка; критерий; моделирование

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6383

Article

Mathematical modeling of the assessment of the degree of vegetation coverage of the territories of infrastructure facilities

Alexey Platonov

*Ph. D. in engineering, associate Professor, Rostov State Transport University (Russian Federation),
paa7@rambler.ru*

Marina Platonova

*Ph. D. in engineering, Voronezh Institute of High Technologies (Russian Federation),
m.platonova@vfrgups.ru*

Received: 28 April 2022 / Accepted: 11 November 2022 / Published: 15 November 2022

Abstract: Removal of growing undesirable vegetation is often performed to properly maintain linear infrastructure facilities (easement areas for roads and railways, shelterbelts for power lines, gas, oil and product pipelines, and others). The authors of the article found that when these operations are organized and performed their quality is not assessed in a proper way. The existing methods and practices for assessing the quality of removal undesirable vegetation operations fail to provide an objective judgment on the effectiveness of activities to clear the infrastructure facilities areas from this vegetation. The density indicator of vegetation growing on an area of 1 hectare is almost universally used as an evaluation criterion. The authors revealed that this indicator features a high degree of subjectivity and does not provide adequate assessment of the degree of trees and shrubs vegetation colonization on the surveyed area. The aim of the study was to develop a mathematical model to assess the degree of infrastructural facilities coverage with undesirable vegetation and to substantiate a criterion that allows assessing the quality of work performed to remove this vegetation. The developed mathematical model takes into account previously identified characteristics of growing vegetation (plants number, crown projection area) and parameters of the surveyed area (studied area acreage and the actual area where vegetation was removed) and other parameters. As an output indicator of the developed mathematical model the authors proposed to use the criterion of non-project coverage of territories with undesirable vegetation. The article presents an example of assessing the quality of operations for vegetation removing from the easement areas of railways for a number of initial data. The criterion developed by the authors for non-project coverage

of the territories of linear infrastructure facilities with undesirable trees and shrubs vegetation may be used when organizing vegetation removal to justify the use of the necessary system of machines and mechanisms. The criterion may be applied to assess the quality of cleaning the infrastructure facilities areas from undesirable vegetation.

Keywords: infrastructure facility; vegetation; removal; operation; evaluation; criterion; modeling

1. Введение

В настоящее время в рамках нормативного содержания территорий таких линейных инфраструктурных объектов, как полосы отвода автомобильных и железных дорог, охранных зон линий электропередачи, трасс газо-, нефте- и продуктопроводов [1—4], нередко предусмотрено выполнение работ по удалению произрастающей нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР). Очистка указанных территорий от одиночных или куртинно произрастающих экземпляров НДКР [5] осуществляется или силами работников соответствующих сетевых организаций (например, работниками путевого хозяйства ОАО РЖД, ответственными за поддержание полосы отвода железной дороги в нормативном состоянии), или силами подрядных и субподрядных организаций, привлекаемых на правах аутсорсинга [6], [7]. Однако выполненными нами в 2021 г. исследованиями было установлено, что при организации и проведении работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территорий различных инфраструктурных объектов [8] не уделяется должного внимания вопросам оценки качества выполненных работ (фото 1, здесь и далее зафиксировано авторами).

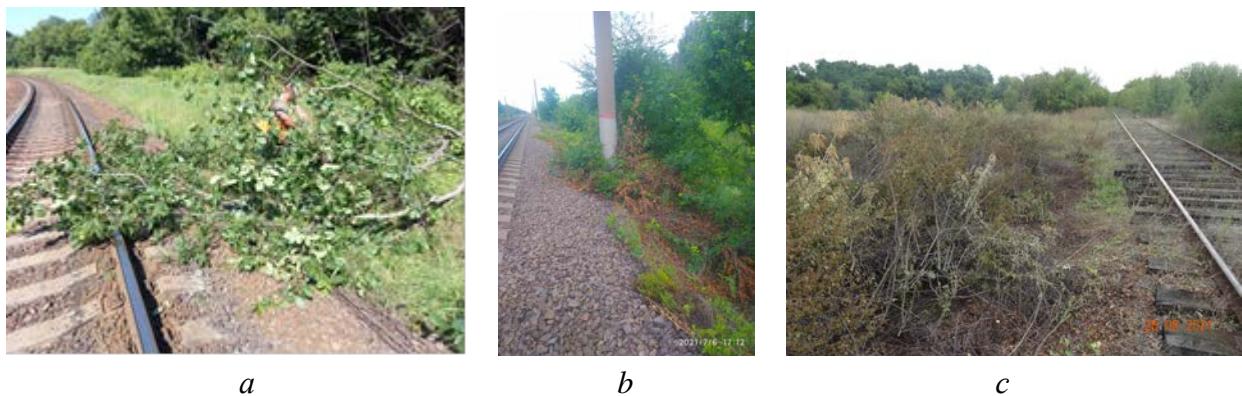


Фото 1. Порубочные остатки на территории участка железной дороги:
 a — Лебеди — Сараевка (Чаплыжное, 69 км, пк 9—10), июнь 2021 г.;
 b — Таловая — Лиски (Хреновая, 235 км — 237 км), июль 2021 г.;
 c — Томаровка — Строитель (1 км, 4 пк — 3 км, 9 пк), август 2021 г.

Photo 1. Logging residues on the territory of the railway section: (a) Lebedi — Saraevka (Chaplyzhnoye, 69 km, checkpoint 9—10), June 2021; (b) Talovaya — Liski (Khrenovaya, km 235—237), July 2021; (c) Tomarovka — Stroitel (1 km, 4 checkpoint — 3 km, 9 checkpoint), August 2021

Нами было выявлено несколько разнообразных способов и методов оценки качества работ по удалению НДКР при фактически полном отсутствии каких-либо критериев, однозначно определяющих степень качества и эффективности выполненных мероприятий по очистке территорий инфраструктурных объектов от нежелательной древесно-кустарниковой

растительности, а также большой доли субъективности в применяемых способах/методах оценки. При этом нами было установлено, что указанная оценка при формировании акта приёмки работ по удалению НДКР нередко вообще не предусмотрена соответствующим техническим заданием или осуществляется формально путём однокритериальной оценки по «объёму» удаления растительности (фактически — по площади, «пройденной» организацией-исполнителем рассматриваемых работ).

С учётом вышеизложенного целью настоящего исследования являлась разработка математической модели оценки степени покрытия нежелательной древесно-кустарниковой растительностью территории инфраструктурных объектов с обоснованием критерия, позволяющего оценить качество выполнения работ по удалению указанной растительности.

2. Материалы и методы

Вопросу наличия или отсутствия произрастающей нежелательной растительности уделяется достаточно много внимания как в отечественной [9—12], так и в зарубежной [13—16] научно-технической литературе и нормативно-справочной документации, однако нами было установлено, что практически всегда [17] в указанных документах рассматривается лишь проблема оценки наличия на той или иной территории нежелательной растительности с целью обоснования необходимости её удаления (в т. ч. аргументирования применения требуемой системы машин и механизмов). При этом в качестве оценочного критерия в подавляющем большинстве случаев рассматривается так называемая «густота» произрастания растительности, определяемая (с большой долей субъективности, нередко лишь визуально, на глаз) как количество экземпляров нежелательной растительности, произрастающей на обследуемой территории площадью 1 га. Объяснением этого является, на наш взгляд, то, что в отличие от ряда таких (выявленных нами) оценочных критериев, как соответствие фактических сроков выполнения работ предусмотренным договором срокам, соблюдение исполнителем работ технологической последовательности операций, наличие у организации-исполнителя работ необходимых машин и механизмов и т. д., критерий густоты растительности, основанный на визуальном восприятии очищаемой от НДКР территории, наиболее нагляден как простому обывателю, так и контролирующем органам.

Между тем показатель густоты нежелательной растительности, при всей общепризнанности данного критерия, не всегда способен адекватно оценить степень зарастания обследуемой территории. Нежелательная растительность, фиксируемая на ряде инфраструктурных объектов в зимних условиях при отсутствии её облиствления (или при начальной её стадии, фото 2a), способна формировать совершенно иное представление о степени зарастания территории инфраструктурного объекта в летних условиях (фото 2b) при полностью выпущенных и выросших до нормального размера листовых пластинках. Аналогично, несколько экземпляров НДКР, находящихся в начальной стадии своего развития (фото 2c; ближняя опора ЛЭП), могут оказать гораздо меньшее впечатление на наблюдателя о степени зарастания обследуемой территории по сравнению с единичным

(но при этом разросшимся и облиственным) экземпляром нежелательной растительности (фото 2с; дальняя опора ЛЭП).



Фото 2. Нежелательная растительность на территориях трасс линий электропередачи: *a* — ПС КБХА — ПС Южная, апрель 2022 г.; *b* — ПС КБХА — ПС Южная, июль 2021 г.; *c* — ПС Красная Яруга — ПС Томаровка, август 2021 г.

Photo 2. Undesirable vegetation on the areas of power transmission lines: (a) TS KBKhA — TS Yuzhnaya, April 2022; (b) TS KBKhA — TS Yuzhnaya, July 2021; (c) TS Krasnaya Yaruga — TS Tomarovka, August 2021

С учётом вышеизложенного нами для оценки качества выполнения работ по удалению нежелательной растительности с территорий линейных инфраструктурных объектов был разработан критерий непроектного покрытия указанных территорий нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, который позволяет учесть не только количество экземпляров НДКР на обследуемой территории (оставшихся после выполнения работ по удалению НДКР), но и величину проекций крон нежелательной растительности на поверхность данной территории.

Выполненное нами исследование было основано в целом на методах математического моделирования.

3. Результаты

При разработке критерия $I_{уч\ ндкр}^K$ непроектного покрытия территорий линейных инфраструктурных объектов нежелательной древесно-кустарниковой растительностью нами принималась во внимание необходимость учёта как характеристик произрастающей НДКР, так и параметров обследуемой территории, а следовательно, данный критерий основан

на результатах обследования указанных территорий на предмет выявления наличия/отсутствия произрастающей нежелательной растительности. Отметим, что такое обследование осуществляется по разработанной нами «Методике оценки качества и эффективности выполнения работ по удалению нежелательной древесно-кустарниковой растительности с территорий линейных инфраструктурных объектов» (детальное изложение которой не входит в цели и задачи данной статьи), что обуславливало необходимость учёта особенностей методики определения характеристик как растительности, так и обследуемой территории, а также особенностей камеральной обработки полученных данных.

Отметим, что в соответствии с вышеуказанной методикой после выполнения работ по удаления с территории инфраструктурного объекта нежелательной растительности осуществляется контрольное таксационное обследование данной территории путём закладки учётных площадок, на каждой из которых фиксируются количество произрастающих экземпляров НДКР, а также степень непроектного покрытия площади указанной учётной площадки. При камеральной обработке полученных данных обследованная территория разбивается на ряд элементарных участков одинаковой площади, а сами данные переносятся в Ведомость оценки покрытия площади участков линейного инфраструктурного объекта нежелательной растительностью (таблица).

Таблица. Ведомость оценки покрытия площади участков линейного инфраструктурного объекта нежелательной древесно-кустарниковой растительностью

Table. Statement for assessing the coverage of the area of sections of a linear infrastructure facility with undesirable tree and shrub vegetation

Для каждой учётной площадки в данной ведомости предусмотрено 10 подобластей (для примера отмечены знаком «х» для 1-го элементарного участка 1-й учётной площадки), при этом графически каждая подобласть соответствует 10 % непроектного покрытия площади соответствующего элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью. Указанное непроектное покрытие участков ЛИО заносится в вышеприведённую ведомость по сведениям Карточек таксации контрольного обследования данных участков. При этом для большей наглядности целесообразно соблюдать выявленное в натуре месторасположение непроектного покрытия площади нежелательной растительностью (особенно для учётных площадок прямоугольной формы).

Входные параметры и выходной показатель разработанной нами математической модели выявления степени непроектного покрытия представлены графически на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема формирования математической модели выявления степени непроектного покрытия нежелательной растительностью

Figure 1. Scheme of a mathematical model formation to identify the degree of non-project coverage with undesired vegetation

При формировании математической модели выявления степени непроектного покрытия территорий линейных инфраструктурных объектов нежелательной растительностью применяются такие, выявляемые в ходе натурного обследования указанных территорий параметры растительности, как количество экземпляров нежелательной древесно-кустарниковой растительности $N^{ндкр}$ и площадь непроектного покрытия обследуемых территорий проекциями крон растительности $S^{kp \text{ ндкр}}$ (м^2). Кроме того, при формировании модели учитываются параметры обследуемых территорий (площадь участка линейного

инфраструктурного объекта $S_{ЛИO_y}$, м²; фактическая площадь, на которой произведено удаление нежелательной растительности $S_{ЛИO\phi}^{н\partialкp}$, м²; контрольная площадь участка линейного инфраструктурного объекта $S^{κ\,н\partialкp}$, м²), а также особенности применяемой методики обследования (принятая к обследованию площадь одной учётной площадки S_{yn} , м²; общее количество учётных площадок N_{yn} ; общее количество элементарных участков обследуемой территории $N_{уч}^κ$; количество учётных площадок, применяемых для контрольного обследования каждого элементарного участка $N_{уч}^κ$).

В целом указанную математическую модель можно представить в виде системы следующих уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} S^{κ\,н\partialкp} = N_{yn} \cdot S_{yn}; \\ S_{\mathcal{E}у\,н\partialкp}^{κ} = \frac{S^{κ\,н\partialкp}}{N_{уч\,нач}^κ}; \\ N_{yn}^κ = \frac{S_{\mathcal{E}у\,н\partialкp}^{κ}}{S_{yn}}; \\ \left[I_{уч\,н\partialкp}^{κ\,w\%} \right] = 10, 15, 20, 30\%; \end{array} \quad \begin{array}{l} I_{пл\,н\partialкp}^κ = \frac{\sum\limits_{j=1}^p S_{уп\,н\partialкp\,j}^κ}{N_{yn}^κ} \cdot 100\% \\ I_{уч\,н\partialкp}^{κ\,w\%} = \frac{N_{уч\,н\partialкp}^{κ\,w\%}}{N_{уч\,н\partialкp}^κ} \cdot 100\% \\ I_{уч\,н\partialкp}^κ = \frac{N_{уч\,н\partialкp}^κ}{N_{уч}^κ} \cdot 100\% \\ \left[I_{уч\,н\partialкp}^κ \right] = 5, 10, 15\% \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $S_{\mathcal{E}у\,н\partialкp}^{κ}$ — площадь одного элементарного участка линейного инфраструктурного объекта, м²; $N_{уч\,нач}^κ$ — начальное количество элементарных участков ($N_{уч\,нач}^κ = 100, 200, 300, \dots$); $S_{уп\,н\partialкp\,j}^κ$ — процентное покрытие площади j -й учётной площадки участка обследуемой территории с зафиксированным на ней произрастанием НДКР; $N_{уч\,н\partialкp}^{κ\,w\%}$ — количество выявленных участков обследуемой территории с непроектным покрытием не более $w\%$ площади каждого участка линейного инфраструктурного объекта нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, где уровень наличия растительности $w = 10, 15, 20$ или 30 ; $N_{уч\,н\partialкp}^κ$ — общее количество выявленных участков обследуемой территории с непроектным произрастанием нежелательной растительности; $I_{пл\,н\partialкp}^κ$ — индекс контроля покрытия площади участков обследуемой территории нежелательной растительностью; $I_{уч\,н\partialкp}^{κ\,w\%}$ — индекс контроля количества участков обследуемой территории с непроектным покрытием не более $w\%$ площади каждого участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, где уровень наличия

растительности $w = 10, 15, 20$ или 30 ; $I_{уч ндкр}^k$ — индекс контроля количества участков обследуемой территории с непроектным произрастанием НДКР.

Данная математическая модель была апробирована нами в 2021 г. на ряде участков инфраструктурных объектов Центральной России путём осуществления их таксационного обследования, при этом были получены протоколы испытаний и акты внедрения в производственный процесс.

В качестве примера рассмотрим определение оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории полосы отвода железных дорог для следующих исходных данных.

Выполнено контрольное таксационное обследование линейного инфраструктурного объекта «Пункт 1 — Пункт 2» протяжённостью 72 км. Контролируемый участок имеет протяжённость 1 км, при этом площадь обследуемой территории данного участка составила $S_{уч ндкр}^k = 500 \text{ м}^2$. Обследование проводилось глазомерно-измерительным способом с применением прямоугольных учётных площадок площадью $S_{yn} = 1 \text{ м}^2$ с одинарным интервалом их расположения по контролируемой площади.

Применив рекомендации Методики таксационного обследования линейного инфраструктурного объекта в части возможности разделения обследуемой территории при камеральной обработке экспериментальных данных на элементарные участки, разделим контролируемый участок на 100 частей (начальное количество элементарных участков $N_{уч нач}^k = 100$) с основной частью площади обследуемого участка ЛИО $S_{осн}^k = 500 \text{ м}^2$.

При этом получим один элементарный участок обследованной территории площадью:

$$S_{эу ндкр}^k = \frac{S_{осн}^k}{N_{уч нач}^k} = \frac{500}{100} = 5 \text{ м}^2. \quad (2)$$

Количество учётных площадок, применяемых для контрольного обследования каждого элементарного участка, будет равно:

$$N_{yn}^k = \frac{S_{эу ндкр}^k}{S_{yn}} = \frac{5}{1} = 5. \quad (3)$$

Сформируем ведомость оценки покрытия площади участка полос отвода железной дороги «Пункт 1 — Пункт 2» нежелательной древесно-кустарниковой растительностью. Указанную ведомость формируем по результатам вышеприведённых вычислений для 100 элементарных участков с количеством учётных площадок $N_{yn}^k = 5$. Переносим в данную ведомость сведения о выявленном (в результате контрольного таксационного обследования) непроектном покрытии площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью. Указанные сведения отмечаем в ведомости для каждой учётной площадки с соблюдением выявленного в натуре месторасположения непроектного

покрытия площади нежелательной растительностью. В целях наглядности данная ведомость (рисунок 2) приведена в сокращённом виде с указанием элементарных участков с наибольшим непроектным покрытием их площади растительностью.

Номер элементарного участка	Учётная площадка					Индекс покрытия площади $I_{пл\ ндкр}^k$	Номер элементарного участка	Учётная площадка					Индекс покрытия площади $I_{пл\ ндкр}^k$
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
5						14	61						28
8						40	63						44
14						18	67						26
19						38	70						18
25						44	73						30
29						10	74						38
33						42	77						32
34						18	79						18
37						30	82						16
42						36	84						34
45						40	87						26
47						32	90						12
51						10	92						34
53						30	94						40
60						16	97						32

Рисунок 2. Пример ведомости оценки покрытия площади участков линейного инфраструктурного объекта нежелательной растительностью

Figure 2. An example of an assessment sheet for area coverage of a linear infrastructure facility with undesirable vegetation

Вычисление индекса контроля $I_{пл\ ндкр}^k$ покрытия площади элементов рассматриваемого участка линейного инфраструктурного объекта нежелательной растительностью и анализ полученных результатов позволил выявить следующее.

Несмотря на то, что полностью заросшие НДКР элементарные участки контролируемого участка инфраструктурного объекта (с 90—100 % покрытия их площади) отсутствуют, нами были выявлены элементарные участки (количеством $N_{уч\ ндкр}^k = 30$) с произрастающей на их территории нежелательной древесно-кустарниковой растительностью различной степени непроектного покрытия площади указанных участков. Учитывая, что общее количество обследованных элементарных участков $N_{уч}^k = 100$, величина индекса контроля

количества элементарных участков с непроектным произрастанием НДКР $I_{уч\ ндкр}^k$ будет равна:

$$I_{уч\ ндкр}^k = \frac{N_{уч\ ндкр}^k}{N_{уч}^k} \cdot 100\% = \frac{30}{100} \cdot 100\% = 30\%. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что полученная величина $I_{уч\ ндкр}^k = 30\%$ превышает максимально допустимые значения данного индекса (для оценки «отлично» [$I_{уч\ ндкр}^k$] = 5 %, для оценки «хорошо» [$I_{уч\ ндкр}^k$] = 10 %, для оценки «удовлетворительно» [$I_{уч\ ндкр}^k$] = 15 %), можно сделать следующий вывод: учитывая рекомендации Методики таксационного обследования линейных инфраструктурных объектов в части Критерии оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории полос отвода железных дорог, при величине индекса $I_{уч\ ндкр}^k = 30\%$ качество выполненных мероприятий по удалению НДКР с территории участка полосы отвода железной дороги «Пункт 1 — Пункт 2» заслуживает предварительную оценку «неудовлетворительно».

В случае получения величины $I_{уч\ ндкр}^k$, соответствующей предварительной оценке «удовлетворительно», «хорошо» или «отлично», необходимо провести более детальное изучение полученных результатов контрольного таксационного обследования, пример которого приведён ниже.

На целом ряде элементарных участков контролируемой территории полосы отвода железных дорог выявлено непроектное произрастание нежелательной растительности с наименьшим (10—18 % на участках с № 5, 14, 29, 34, 51, 60, 70, 79, 82 и 90) и наибольшим (40—44 % на участках с № 8, 25, 33, 45 и 63) процентом покрытия площади указанных элементарных участков. Например, для элементарного участка № 25 суммарный процент покрытия его площади $\sum S_{ун\ ндкр\ j}^k = 220$ (для 1-й учётной площадки 50 %, для 2-й — 40 %, для 3-й — 30 %, для 4-й — 40 %, для 5-й — 60 %), что при количестве учётных площадок $N_{ун}^k = 5$ обуславливает 44 % покрытия площади указанного элементарного участка нежелательной растительностью.

С учётом выполненного для всех элементарных участков расчёта индекса $I_{пл\ ндкр}^k$ контроля покрытия их площади нежелательной растительностью выявим накопленный процент количества указанных участков непроектного покрытия НДКР при помощи индекса $I_{уч\ ндкр}^{k\ w\%}$ для установления соответствия контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно».

Для уровня наличия растительности $w = 10\%$ индекс контроля количества элементарных участков с непроектным покрытием не более 10 % площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью определится как:

$$I_{уч\ ндкр}^{κ\ 10\%} = \frac{N_{уч\ ндкр}^{κ\ 10\%}}{N_{уч\ ндкр}^κ} \cdot 100\% = \frac{2}{30} \cdot 100\% = 6,67\%, \quad (5)$$

где $N_{уч\ ндкр}^{κ\ 10\%} = 2$ — количество выявленных элементарных участков с непроектным покрытием не более 10 % площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью.

Ввиду того, что величина индекса контроля $I_{уч\ ндкр}^{κ\ 10\%} = 6,67\% < [I_{уч\ ндкр}^{κ\ 10\%}] = 75\%$, дальнейшую проверку на соответствие контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «отлично» (а именно: на остальных элементарных участках нежелательной растительностью должно быть занято не более 15 % площади каждого участка) не осуществляем.

Аналогично для уровня наличия растительности $w = 15\%$:

$$I_{уч\ ндкр}^{κ\ 15\%} = \frac{N_{уч\ ндкр}^{κ\ 15\%}}{N_{уч\ ндкр}^κ} \cdot 100\% = \frac{4}{30} \cdot 100\% = 13,33\%, \quad (6)$$

где $N_{уч\ ндкр}^{κ\ 15\%} = 4$ — количество выявленных элементарных участков с непроектным покрытием не более 15 % площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью.

Ввиду того, что величина индекса контроля $I_{уч\ ндкр}^{κ\ 15\%} = 13,33\% < [I_{уч\ ндкр}^{κ\ 15\%}] = 50\%$, дальнейшую проверку на соответствие контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «хорошо» (а именно: на остальных элементарных участках нежелательной растительностью должно быть занято не более 20 % площади каждого участка) не осуществляем.

Аналогично для уровня наличия растительности $w = 20\%$:

$$I_{уч\ ндкр}^{κ\ 20\%} = \frac{N_{уч\ ндкр}^{κ\ 20\%}}{N_{уч\ ндкр}^κ} \cdot 100\% = \frac{10}{30} \cdot 100\% = 33,33\%, \quad (7)$$

где $N_{уч\ ндкр}^{κ\ 20\%} = 10$ — количество выявленных элементарных участков с непроектным покрытием не более 20 % площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью.

Ввиду того, что величина индекса контроля $I_{уч ндкп}^{κ 20\%} = 33,33 \% > [I_{уч ндкп}^{κ 20\%}] = 25\%$, осуществляем дальнейшую проверку на соответствие контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «удовлетворительно» (а именно: на остальных элементарных участках нежелательной растительностью должно быть занято не более 30 % площади каждого участка).

Для уровня наличия растительности $w = 30 \%$:

$$I_{уч ндкп}^{κ 30\%} = \frac{N_{уч ндкп}^{κ 30\%}}{N_{уч ндкп}^{κ}} \cdot 100\% = \frac{16}{30} \cdot 100\% = 53,33 \%, \quad (8)$$

где $N_{уч ндкп}^{κ 30\%} = 16$ — количество выявленных элементарных участков с непроектным покрытием не более 30 % площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью.

Принимая во внимание, что полученная величина $I_{уч ндкп}^{κ 30\%} = 53,33 \% < 100 \%$ меньше допустимого значения данного индекса ($[I_{уч ндкп}^{κ 30\%}] = 100 \%$), предположение о соответствии контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «удовлетворительно» не подтверждено.

По результатам определения оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории полосы отвода железных дорог сформируем следующее **«ЗАКЛЮЧЕНИЕ к контрольному таксационному обследованию участка»:**

Для оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории полосы отвода железных дорог было выполнено контрольное таксационное обследование линейного инфраструктурного объекта «Пункт 1 — Пункт 2» протяжённостью 72 км, при этом контролируемый участок имел протяжённость 1 км, а площадь обследуемой территории данного участка составила $S^{κ ндкп} = 500 \text{ м}^2$. При камеральной обработке экспериментальных данных контролируемый участок был разделён на 100 частей (элементарных участков), каждый площадью 5 м^2 .

Детальное изучение полученных результатов контрольного таксационного обследования позволило выявить непроектное произрастание нежелательной растительности с наименьшим (10—18 %) и наибольшим (40—44 %) процентом покрытия площади указанных элементарных участков, при этом полностью заросшие НДКР элементарные участки контролируемого инфраструктурного объекта (с 90—100 % покрытия их площади) отсутствуют.

В соответствии с Методикой таксационного обследования линейных инфраструктурных объектов была рассчитана величина Критерия оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории полосы отвода железной дороги, выполнено его сравнение с граничными значениями данного критерия. Результаты указанных расчётов и сравнений

для установления соответствия контролируемого участка полосы отвода железных дорог оценке «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно» показали следующее.

Величина индекса контроля количества элементарных участков с непроектным произрастанием НДКР $I_{уч ндкр}^K = 30\%$ превышает максимально допустимые значения данного индекса: для оценки «отлично» — на 25 %, для оценки «хорошо» — на 20 %, для оценки «удовлетворительно» — на 15 %.

Для различного уровня наличия растительности ($w = 10, 15, 20$ и 30%) величина индекса $I_{уч ндкр}^{K w\%}$ контроля количества элементарных участков с непроектным покрытием не более w площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью в 75 % случаев не превышает минимально допустимые граничные значения данного индекса, при этом для оценки «отлично» выявлено несоответствие в $-68,33\%$, для оценки «хорошо» определено несоответствие в $-36,67\%$, для оценки «удовлетворительно» установлено соответствие в $8,33\%$ (при проверке дополнительного показателя — несоответствие в $-46,67\%$).

Ввиду выявленных нами несоответствий величин индекса $I_{уч ндкр}^{K w\%}$ контроля количества элементарных участков с непроектным покрытием не более $w\%$ площади каждого элементарного участка нежелательной древесно-кустарниковой растительностью (где уровень наличия растительности $w = 10, 15, 20$ или 30%) граничным значениям указанных индексов, принимая во внимание превышение индекса $I_{уч ндкр}^K$ контроля количества элементарных участков с непроектным произрастанием НДКР над допустимым значением данного индекса, а также учитывая рекомендации Методики таксационного обследования линейного инфраструктурного объекта в части Критериев оценки качества выполняемых мероприятий по удалению НДКР с территории линейных инфраструктурных объектов, качество выполненных мероприятий по удалению НДКР с территории участка полосы отвода железной дороги «Пункт 1 — Пункт 2» заслуживает оценку «неудовлетворительно».

Обследованный участок линейного инфраструктурного объекта в части произрастания на его территории нежелательной древесно-кустарниковой растительности находится в ненормативном техническом состоянии.

4. Обсуждение и заключение

1. Предложенная в данном исследовании математическая модель оценки степени непроектного покрытия нежелательной древесно-кустарниковой растительностью территорий инфраструктурных объектов имеет определённые преимущества над существующими моделями. Наряду со значительным уменьшением доли субъективной составляющей в итоговом результате оценки соотношения «наличие — отсутствие»

произрастающей нежелательной растительности разработанная модель позволяет учесть как характеристики указанной растительности (не только количество её экземпляров, но и площадь непроектного покрытия обследуемых территорий проекциями крон растительности), так и параметры (в частности, площади) данных территорий.

2. Разработанный в данном исследовании критерий непроектного покрытия территорий линейных инфраструктурных объектов нежелательной древесно-кустарниковой растительностью, основанный на таксационном обследовании указанных территорий, может быть применён при организации работ по удалению указанной растительности для обоснования применения необходимой системы машин и механизмов, а также при оценке качества выполнения работ по очистке территорий инфраструктурных объектов от нежелательной растительности.

Список литературы

1. Сощенко А. Е. Развитие методов и технических средств обеспечения эксплуатационной надёжности линейной части трубопроводного транспорта нефти: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.19. Уфа, 2005. 48 с.
2. Шергунова Н. А. Повышение надёжности воздушных линий электропередачи распределительных сетей: монография. М: Энергоатомиздат, 2006. 211 с.
3. Научно-методические основы управления надёжностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта: монография / В. К. Котов, В. Р. Антонец, Г. П. Лабецкая, В. В. Шмытинский. М: УМЦ ЖДТ, 2012. 193 с.
4. Курганов В. М., Грязнов М. В. Обеспечение надёжности в системе управления перевозками и производством на автомобильном транспорте: монография. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2012. 125 с.
5. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
6. Лапидус Б. М. Аутсорсинг как одно из приоритетных направлений в реформировании и повышении эффективности российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2006. № 2. С. 40—44.
7. Павлов А. Современные подходы в области управления растительностью вдоль воздушных ЛЭП // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № S2 (17). С. 24—29.
8. Платонов А. А. Исследование и систематизация существующих технологических процессов удаления нежелательной растительности // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 3 (47). С. 63—73. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73.
9. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей: монография / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров. М.: Флинта-Наука, 2007. 208 с.
10. Кузьмин И., Байрамов И., Виноградов С. Содержание трасс ВЛ в нормативном состоянии. Контроль растительности // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № S2 (17). С. 2—7.
11. Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions // Scandinavian Journal of Forest Research. 2013. Vol. 28, no. 8. P. 758—774. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299.

12. Ivashnev M. V., Vasiliev A. S., Shegelman I. R. Synthesis methodology of patentable technical solutions: a case of equipment for removing tree and shrubbery vegetation // *Astra Salvensis*. 2018. Vol. 6. P. 531—540.
13. Kukkonen M., Kukkonen E. Koneellinen metsänhoito. Kuopio: Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja, 2013. 69 p.
14. Miller R. H. Integrated Vegetation Management. Atlanta: International Society of Arboriculture, 2021. 108 p.
15. Rask A. M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces // *Weed Research*. 2007. No. 47 (5). P. 370—380. DOI: 10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x.
16. Matthies M., Beyer A. Role of vegetation on the overall persistence and long-range transport potential // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2003. Vol. 17, no. 4. P. 252—255. DOI: 10.1007/s00477-003-0141-9.
17. Ersson B. T., Platonov A., Zimarin S. V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Cep. «International Forestry Forum “Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions”». 2020. P. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012022.

References

1. Soshchenko A. E. *Development of methods and technical means to ensure the operational reliability of the linear part of the oil pipeline transport: Ph.D. dis. ... doc. tech. Sciences: 25.00.19*. Ufa, 2005. 48 p. (In Russ.)
2. Shergunova N. A. *Improving the reliability of overhead transmission lines of distribution networks: monograph*. Moscow, Energoatomizdat, 2006. 211 p. (In Russ.)
3. Kotov V. K., Antonets V. R., Labetskaya G. P., Shmytinsky V. V. *Scientific and methodological foundations for managing the reliability and safety of operation of railway communication networks: monograph*. Moscow, UMTs ZHDT, 2012. 193 p. (In Russ.)
4. Kurganov V. M., Gryaznov M. V. *Ensuring reliability in the system of transportation and production management in road transport: monograph*. Magnitogorsk, Magnitogorsk Press House, 2012. 125 p. (In Russ.)
5. Grigoriev I. V., Grigorieva O. I., Churakov A. A. Efficient technologies and systems of machines for small-volume wood harvesting. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
6. Lapidus B. M. Outsourcing as one of the priority areas in reforming and improving the efficiency of Russian railways. *Railway transport*, 2006, no. 2, pp. 40—44. (In Russ.)
7. Pavlov A. Modern approaches in the field of vegetation management along overhead power lines. *Electricity. Transfer and distribution*, 2020, no. S2 (17), pp. 24—29. (In Russ.)
8. Platonov A. A. Research and systematization of existing technological processes for removing unwanted vegetation. *Systems. Methods. Technology*, 2020, no. 3 (47), pp. 63—73. doi: 10.18324/2077-5415-2020-3-63-73 (In Russ.)
9. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyerov L. D. *Designs and parameters of machines for clearing forest areas*. Moscow, Flinta-Nauka, 2007. 208 p. (In Russ.)
10. Kuzmin I., Bayramov I., Vinogradov S. Maintenance of overhead lines in the standard state. Vegetation control. *Electricity. Transfer and distribution*, 2020, no. S2 (17), pp. 2—7. (In Russ.)
11. Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, no. 8, pp. 758—774. doi: 10.1080/02827581.2013.838299.

12. Ivashnev M. V., Vasiliev A. S., Shegelman I. R. Synthesis methodology of patentable technical solutions: a case of equipment for removing tree and shrubbery vegetation. *Astra Salvensis*, 2018, vol. 6, pp. 531—540.
13. Kukkonen M., Kukkonen E. *Koneellinen metsänhoito*. Kuopio: Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja, 2013. 69 p.
14. Miller R. H. *Integrated Vegetation Management*. Atlanta: International Society of Arboriculture, 2021. 108 p.
15. Rask A. M., Kristoffersen P. A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research*, 2007, no. 47 (5), pp. 370—380. doi: 10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x.
16. Matthies M., Beyer A. Role of vegetation on the overall persistence and long-range transport potential. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2003, vol. 17, no. 4, pp. 252—255. doi: 10.1007/s00477-003-0141-9.
17. Ersson B. T., Platonov A., Zimarin S. V. Analysis of the information content of tenders for the removal of unwanted vegetation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Cep. «International Forestry Forum “Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions”», 2020, pp. 012022. doi: 10.1088/1755-1315/595/1/012022.



DOI: 10.15393/j2.art.2022.6423

УДК 630*432

Статья

Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом, методами оптического распознавания и оптического измерения

Гнусов Максим Александрович

*кандидат технических наук, научный сотрудник, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
mgnusov@yandex.ru*

Драпалюк Михаил Валентинович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), md@vglta.vrn.ru

Попиков Пётр Иванович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), popikovpetr@yandex.ru

Дручинин Денис Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), druchinin.denis@rambler.ru

Бухтояров Леонид Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), vglta-mlx@yandex.ru

Ступников Дмитрий Сергеевич

*кандидат технических наук, инженер-конструктор, ООО «НПП «ТЕТА»,
Neiti1992@mail.ru*

Получена: 31 мая 2022 / Принята: 6 декабря 2022 / Опубликована: 11 декабря 2022

Аннотация: Проведение полевых экспериментальных исследований является неотъемлемой частью процесса разработки и исследования сельскохозяйственных и лесных орудий. Грунтометательная техника, применяемая для тушения и предупреждения лесных низовых пожаров, проходит ряд теоретических и лабораторно-полевых исследований. От момента отрыва фрезерным рабочим

органом до момента встречи с кромкой лесного низового огня почвогрунт находится в полёте в виде фрагментов, перемещающихся в воздушной среде под действием законов аэродинамики и противодействующих сил. Значительный рост вычислительной мощности компьютеров, развитие процесса моделирования, а также совершенствование алгоритмов позволяют пополнить базу по применению компьютерного зрения и методов оптического измерения при проведении научных исследований. Цель работы — определение характеристик движения потока почвогрунта в воздушной среде методами оптического распознавания и оптического измерения по видеоряду. Для достижения поставленной цели исследования необходимо выявить наиболее эффективный метод оптического распознавания, позволяющий с высокой надёжностью отделить поток почвогрунта от фона и разработать математический аппарат, позволяющий по каждому кадру видеозаписи полевого эксперимента определить характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтометательной техникой. В ходе проведения научных исследований нами были проверены пять основных методов оптического распознавания по видеоряду для определения наиболее эффективного метода отделения изображения потока почвогрунта от фоновых изображений (деревьев, веток, травы и т. д.): разделение по цветам, разделение по яркости, комбинация методов по цветам и яркости, определение изображения фона (предварительное или путём усреднения множества видеокадров) и отделение движущихся объектов на видеокадре от фона, выделение размытых в движении участков кадров. Анализ методов показал, что комбинированный цвето-яркостный метод максимально эффективен для реализации поставленной в работе цели. Исходя из формы траектории движения потока почвогрунта установлено, что грунтомёт подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с, при этом дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую. Угол оседания частиц почвогрунта на поверхность составляет около 73° к горизонту, что благоприятствует тушению кромки лесного низового пожара.

Ключевые слова: оптическое распознавание; грунтомёт; поток почвогрунта; картограмма распределения плотности потока; картограмма скоростей потока

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6423

Article (Review)

Determination of the characteristics of the soil flow formed by the soil thrower by optical recognition and optical measurement methods

Maxim Gnusov

Ph. D. in engineering, researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), mgnusov@yandex.ru

Mikhail Drapalyuk

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), md@vglta.vrn.ru

Petr Popikov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru

Denis Druchinin

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), druchinin.denis@rambler.ru

Leonid Bukhtoyarov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), vglta-mlx@yandex.ru

Dmitry Stupnikov

Ph. D. in engineering, design engineer, NPP TETA LLC, Neiti1992@mail.ru

Received: 31 May 2022 / Accepted: 6 December 2022 / Published: 11 December 2022

Abstract: Conducting field experimental research is an integral part of the development and research of agricultural and forestry tools. Soil-throwing equipment used to extinguish and prevent forest ground fires is undergoing a number of theoretical and laboratory and field studies. From the moment of separation by the milling working body until the moment it meets the edge of the forest ground fire the soil is in free flight in the form of fragments moving in the air under the influence of the laws of aerodynamics and opposing forces. A significant increase in the computing power of computers, the development of the modeling process, as well as the improvement of

algorithms provided an opportunity to apply computer vision and optical measurement methods in scientific research more effectively. The purpose of the work is to determine the characteristics of the movement of the soil flow in the air by the methods of optical recognition and optical measurement from the video sequence. To achieve the purpose it is necessary to identify the most effective method of optical recognition, which makes it possible to separate the flow of soil from the background with high reliability and develop a mathematical apparatus that allows the characteristics of the soil flow formed by forest fire soil-throwing equipment to be determined for each frame of the video recording of the field experiment. In the course of scientific research we have tested five main methods of optical recognition by video sequence to determine the most effective method for separating the image of the soil flow from background images (trees, branches, grass, etc.). These methods provide separating by color, separating by brightness, combining methods by colors and brightness, determining the background image (preliminary or by averaging a set of video frames) and separating moving objects on a video frame from the background, highlighting areas of frames blurred in motion. Analysis of the methods showed that the combined color-brightness method is the most effective one to achieve the purpose of the study. Judging from the shape of the trajectory of the soil flow it was found that the forest fire soil thrower delivers the soil flow at an angle of 35° to the horizon with an initial speed of 14 m/s, while the distance of throwing the soil is 11 m. As the soil flow moves, the speed first decreases from 14 m/s to 6 m/s due to the flight of the soil upwards and the transition of kinetic energy into potential energy, then increases from 6 m/s to 8 m/s as the soil falls to the surface due to the transition of potential energy into kinetic energy. The angle of soil particles subsidence on the surface is about 73° to the horizon which favors extinguishing the edge of a forest ground fire.

Keywords: optical recognition; soil thrower; soil flow; flow density distribution cartogram; flow velocity cartogram

1. Введение

Проведение полевых экспериментальных исследований является неотъемлемой частью процесса разработки и исследования процессов функционирования сельскохозяйственных и лесных орудий [1—4]. Оцифровка данных экспериментальных исследований в последние годы претерпела ряд изменений, появление персональных компьютеров позволило вносить данные сразу в таблицы обработки и получать предварительные результаты ещё в «полях». Грунтотематическая техника, применяемая для тушения и предупреждения лесных низовых пожаров, проходит ряд вычислительных и лабораторно-полевых экспериментов [5—9]. От момента отрыва фрезерным рабочим органом до момента встречи с кромкой лесного низового огня почвогрунт находится в воздушном пространстве в виде фрагментации и подвергается сопротивлению со стороны противодействующих сил. Значительный рост вычислительной мощности компьютеров, развитие процесса моделирования, а также совершенствование алгоритмов предоставило возможность повысить прогресс по применению компьютерного зрения и методов оптического измерения при проведении научных исследований [10]. Компьютерное зрение призвано решать задачи, связанные со сбором и анализом зрительной информации в различных областях производства, при этом частично или полностью заменяя человека [11]. В работе [12] отображены современные методы формирования структурных описаний изображений.

Для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтотематической техникой, целесообразно использовать современные методы оптического распознавания и оптических измерений [13]. Полученные в результате экспериментального исследования видеозаписи содержат детальную информацию о характере движения потоков почвогрунта: разрешение кадров 1920×1080 пикселей и более при частоте видеосъёмки 30 кадров/с.

Цель настоящей работы заключалась в определении характеристик движения потока почвогрунта в воздушной среде методами оптического распознавания и оптического измерения по видеоряду. Для достижения поставленной цели и задач исследования необходимо выявить наиболее эффективный метод оптического распознавания, позволяющий с высокой надёжностью отделить поток почвогрунта от фона и разработать математический аппарат, позволяющий по каждому кадру видеозаписи полевого эксперимента определить характеристики формируемого грунтотематической техникой потока почвогрунта.

2. Материалы и методы

Для реализации поставленной задачи нами был разработан и изготовлен лабораторный грунтотемёт. Вначале были проанализированы основные методы оптического распознавания по видеоряду для поиска наиболее эффективного метода отделения изображения потока почвогрунта от фоновых изображений (деревьев, веток, травы и т. д.).

Сложность оптического выделения потока почвогрунта обусловлена следующими

причинами: малая цветовая дисперсия изображения (изображение в оттенках серого), сложный для отделения фон, представляющий собой совокупность веток и стволов деревьев, движимых ветром, и существенно изменяющийся от кадра к кадру; также следует учитывать размытость потоков почвогрунта и области запыления и перемещение трактора «от нас», требующее коррекцию при межкадровом усреднении. В ходе проведения научных исследований нами были проверены методы:

- *разделение по цветам* — довольно эффективный метод, однако его недостатком является выделение красного канала, что влияет на плохое выделение тёмных частей изображения, которые представляют основную часть движущегося потока почвогрунта и отображаются на изображении практически чёрным цветом, без красноватого оттенка;
- *разделение по яркости* — поток почвогрунта на видеокадрах имеет преимущественно чёрный цвет, т. е. низкую яркость, но при этом также отделяется множество артефактов изображения фона, связанных с движением ветвей и стволов деревьев под действием ветра, однако яркостный метод сам по себе не позволяет выделить поток почвогрунта;
- *комбинация методов по цветам и по яркости* — выделение потока почвогрунта по красному каналу и по низкой яркости, определённую проблему составляет наличие изображений фона, однако их можно устраниить путём усреднения видеокадров, дополнительным преимуществом данного метода является фильтрация областей запыления. Таким образом, комбинированный метод выделения потока почвогрунта по яркости и цветности является достаточно эффективным для последующего получения характеристик потока почвогрунта. Разделение на постоянный фон и меняющиеся фрагменты изображения;
- *определение изображения фона (предварительное или путём усреднения множества видеокадров) и отделение движущихся объектов на видеокадре от фона* — этот метод является одним из способов оптического распознавания и широко используется в техническом зрении. Нами была произведена проверка эффективности данного метода. Несмотря на то, что во многих технических системах данный метод является эффективным, для потока почвогрунта он показал низкую эффективность. Наибольшей проблемой является то, что поток почвогрунта имеет практически одно и то же изображение на серии видеокадров, и поиск отличия текущего кадра от основных не позволяет выделить ядро потока, в то же время есть возможность выделить флюктуации потока и его дискретную структуру. Данный метод оптического распознавания хорошо работает для отделения пешеходов или автомобилей от фона, отделения автомобильных знаков и т. п. [14], но его нецелесообразно использовать для отделения практически неподвижного и слабо меняющегося объекта. Таким образом, метод отделения потока почвогрунта от фона использовать нецелесообразно;
- *выделение размытых в движении участков кадров* — поток почвогрунта на видеокадрах является «размытым в движении». Поэтому будет верно проверить также метод выделения локальной размытости изображения. Однако данный метод показал низкую эффективность в выделении потока почвогрунта. Проблема заключается в том, что фоновое

изображение из-за низкой контрастности между отдельными ветвями деревьев и артефактов JPG-сжатия при передаче видеокамерой воспринимается как размытое, практически так же, как и поток почвогрунта. Поэтому данный метод выделения потока почвогрунта использовать нецелесообразно.

Подводя итог проверки различных методов отделения потока почвогрунта от фонового изображения, можно сделать вывод, что наилучшую надёжность отделения и лучшее пространственное разрешение имеет комбинированный цвето-яркостный метод. Данный метод и был использован в дальнейшем для получения характеристик движущегося в воздушном пространстве потока почвогрунта, подаваемого грунтомётом.

3. Результаты

Так как видеофиксация потока почвогрунта проводилась из точки, расположенной довольно близко к потоку почвогрунта (не на бесконечном удалении), на изображениях происходит сферическое оптическое искажение, не позволяющее напрямую получить, например, картограмму распределения плотности потока в пространстве, поэтому необходимо провести коррекцию сферических оптических искажений.

Для коррекции сферического оптического искажения используется следующий математический аппарат. Будем считать схему объектива эквидистантной, которая при качественных оптических компонентах имеет только радиальную составляющую бочкообразной дисторсии. Коррекцию последней можно осуществить по формуле (1):

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(\mathbf{r}_p) \mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(\mathbf{r}_p). \quad (1)$$

Данная формула позволяет с помощью функции f пересчитать принадлежащие плоскости пиксели с координатами \mathbf{r}_p через принадлежащие полусфере пиксели с координатами \mathbf{r}_s (\mathbf{r} — векторная величина, поэтому выделена жирным шрифтом). Функция f задаётся следующим аналитическим выражением (2):

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(\mathbf{r}_p) \mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(\mathbf{r}_p) \quad (2)$$

где R_0 — это радиус в пикселях, соответствующий углу 90° на исходном изображении относительно оси симметрии объектива.

С помощью указанной функции преобразования f проводилась предварительная коррекция сферического искажения анализируемых кадров. Таким образом, нами произведена проверка эффективности основных методов оптического распознавания потока почвогрунта по видеоряду, полученному в ходе полевого эксперимента грунтомёта. Цвето-яркостное отделение потока почвогрунта оказалось наиболее надёжным для фона, представляющего собой ветви деревьев лесного массива, движимые ветром.

3.1. Методика определения характеристик потока почвогрунта по видеоряду

На этапе предварительного исследования, описанного в материалах и методах, было установлено, что цвето-яркостный способ отделения изображения потока почвогрунта от фона является наиболее эффективным для достижения поставленной цели.

3.2. Математический аппарат для выделения потока почвогрунта от фона

В данной работе использовались изображения (последовательные кадры видеозаписи) размером 1920×1980 пикселей в формате BMP. В формате BMP цвет каждого пикселя задаётся тремя числами — яркостью красного, зелёного, синего компонентов цвета. Часто этот формат называют RGB (Red, Green, Blue) с качеством передачи интенсивности по каждому каналу 1 байт/пиксель.

С математической точки зрения изображение представляет собой три матрицы яркости $I_{ij}^R, I_{ij}^G, I_{ij}^B$, где R, G, B — индекс цветового канала (красный, зелёный, синий соответственно), i и j — номера пикселя по горизонтали (слева направо) и вертикали (сверху вниз).

Метод цвето-яркостного отделения потока почвогрунта от фона позволяет получить матрицу I_{ij}^{pr} , элементы которой могут принимать два значения: «1», если в данной точке изображения находится поток почвогрунта, или «0», если в данной точке изображения находится фон, но не поток почвогрунта.

Цвето-яркостное отделение производилось по следующему условию:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (3)$$

где 8 — константа запаса надёжности отделения красного цвета от зелёного и синего каналов (может использоваться другое число, подбираемое в процессе предварительной настройки; число 8 указано для диапазона яркости 0—255); I_{ij} и I_{ij}^0 — яркости пикселя ij , переведённые в градации серого для текущего изображения и калибровочного изображения без потока почвогрунта (кадр до начала метания потока почвогрунта).

При распознавании потока почвогрунта на виде «сзади» необходимо было учитывать постепенное удаление машины. Для этого производилась коррекция изображения на известное расстояние между задними указателями поворота трактора, которые имеют жёлтый цвет и хорошо выделяются на фотографиях. В ходе проведения коррекции производилось линейное преобразование:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (4)$$

где L и L_0 — расстояние между указателями поворота на текущем видеокадре и исходном видеокадре.

Поиск указателей поворота (сначала левого, затем правого) на изображениях производился автоматически программой на порядок 10^2 — 10^3 видеокадров, что потребовало

использования надёжного метода поиска. Поиск основан на методе Монте-Карло с сужением диапазонов. Необходимо найти координаты x_i , y_i центра указателя поворота ($i = 1—2$) в ортогональной системе координат, связанной с изображением. В дальнейшем для переменных будем использовать обозначение p_{ji} , где p — искомый параметр, j — номер параметра ($1—2$ — координата y), i — номер указателя поворота (фото 1).



Фото 1. Пример кадра из видеозаписи экспериментального исследования: *а* — кадр из видеозаписи; *б* — найденные задние указатели поворота трактора на жёлтом канале изображения

Photo 1. An example of a frame from a video recording of an experimental study: **(a)** a frame from a video recording; **(b)** found rear turn indicators of the tractor on the yellow channel of the image

Задача поиска сводится к оптимизационной задаче [15], [16], при этом критерием оптимизации K является количество пикселей жёлтого цвета в окне сканирования квадратной формы [17—26]. Необходимо так поместить квадратное окно сканирования размером 25×25 пикселей на изображение (найти координаты его центра x , y), чтобы было наибольшим количество жёлтых точек, попавших в окно сканирования:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (5)$$

где I^Y — интенсивность пикселя жёлтого канала изображения. В процессе поиска необходимо найти максимум критерия K .

Для поиска положения x , y указателя поворота на изображении 1920×1080 пикселей необходимо использовать метод численной оптимизации. Задача оптимизации осложнена дискретностью переменных x , y и большим количеством ложных локальных оптимумов (порядка $10^2—10^5$). Поэтому из большого количества методов численной оптимизации был выбран наиболее универсальный и надёжный метод Монте-Карло (МК), который требует значительных вычислительных ресурсов. Метод МК заключается в многократном случайном переборе параметров x , y и последующем выборе комбинации параметров, для которой критерий K принимает наибольшее значение. Для существенного ускорения сходимости

метода МК использована его модификация с регулярным сужением диапазонов. Таким образом, для оптимизации использован метод Монте-Карло с сужением диапазонов (МКСД). Кроме того, для поиска используется многократный «поиск с начала», чтобы снизить вероятность нахождения максимумов.

Общее количество шагов в методе МКСД составляло 40 000. На каждом шаге генерируется случайный набор переменных x, y с помощью предоставляемого системой программирования генератора случайных чисел с равномерным законом распределения вероятности:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (6)$$

где G_{11} и G_{12} — границы диапазона поиска переменной x (границы изображения 0 и 1920 пикселей соответственно); G_{21} и G_{22} — границы диапазона поиска переменной y (границы изображения 0 и 1980 пикселей соответственно); i — номер итерации; F_k — последовательные реализации случайной величины, распределённой равномерно в диапазоне 0—1 [27—31]; k — номер реализации случайной величины F .

Для каждого случайного набора x, y рассчитывается критерий оптимизации K по формуле (7). Если критерий K оказывается больше найденного ранее хорошего значения K_b (индекс « b » — от английского слова *best* — лучший), т. е. $K > K_b$, производится запоминание текущего набора переменных x, y как наилучшего: $x_b = x, y_b = y$.

Таким образом, при поиске указателей поворота решается следующая задача оптимизации:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (7)$$

где $x_i^{\text{опт}}, y_i^{\text{опт}}$ — координаты расположения квадратного окна, лучше всего охватывающего указатель поворота.

3.3. Определение характеристик потока почвогрунта

Для определения характеристик потока почвогрунта производилось предварительное усреднение картограмм распределения потока почвогрунта по множеству кадров (около 600, что соответствует 20 с эксперимента со скоростью съёмки 30 кадров в секунду). По усреднённой картограмме, представляющей собой матрицу размером 400×400 элементов, рассчитывались приведённые ниже характеристики потока почвогрунта.

3.4. Программа для определения характеристик потока почвогрунта

Для автоматизированного анализа кадров видеозаписей экспериментального полевого исследования была разработана компьютерная программа [32].

«Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом, на основе оптического распознавания» (фото 2) позволила получить картограмму распределения плотности потока почвогрунта и определить по ней различные

характеристики его потока.

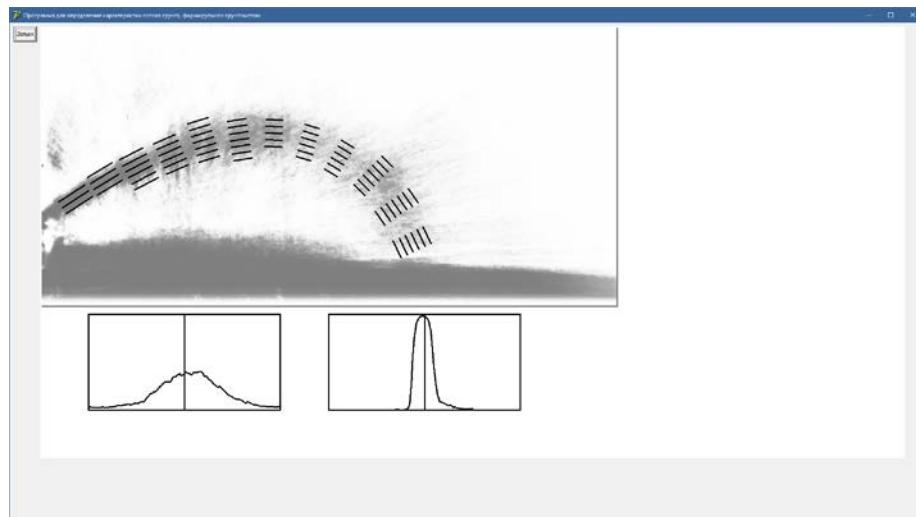


Фото 2. Интерфейсная форма «Программы для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтотётом, на основе оптического распознавания»

Photo 2. Interface form of the «Program for determining the characteristics of the soil flow formed by a soil thrower based on optical recognition»

Программа разработана на языке Object Pascal среды Borland Delphi 7 для операционной системы Windows 10 и предназначена для оптического распознавания и определения характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтотётом, на видеокадрах полевого экспериментального исследования. В тексте программы может быть выбран один из методов отделения изображения потока почвогрунта от фонового изображения. Программа применима для видеокадров верхнего и продольного ракурсов съёмки грунтотёта.

3.5. Характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтотётом

Полученные в экспериментальном исследовании видеозаписи позволяют определить множество характеристик движущегося потока почвогрунта. Основными из них являются картограммы и эпюры распределения плотности потока, абсолютного значения и направления скорости потока, полученные для ракурсов «сзади» и «сверху».

3.6. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости плотности потока почвогрунта

По итогам проведения полевых испытаний грунтотёта получена картограмма распределения плотности потока почвогрунта (фото 3).

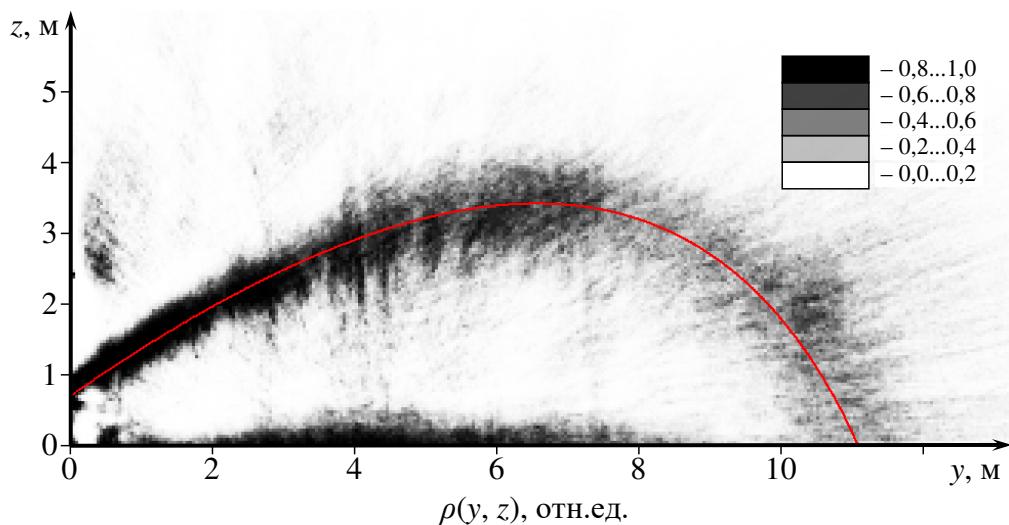


Фото 3. Картограмма распределения плотности ρ потока почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 3. Cartogram of the distribution of soil flow density ρ in the vertical transverse plane YZ

Картограмма получена усреднением 600 кадров (20 с работы грунтомёта со скоростью съёмки 30 кадров в секунду). В результате обработки получилась достаточно качественная картограмма с практически отсутствующими артефактами от деревьев и ветвей фоном изображения.

Необходимо отметить, что усреднённый поток почвогрунта является довольно узким и направленным в требуемом направлении, несмотря на то, что картограмма усреднена по длительному времени работы (20 с движения грунтомёта в ходе проведения эксперимента). При этом визуальный анализ отдельных кадров показывает, что поток существенно варьировался: от выброса на малое расстояние около 4 м при неблагоприятных условиях захвата почвогрунта до выброса на предельное расстояние около 15 м. Узость усреднённого потока свидетельствует о том, что большую часть времени (порядка 80 %) формируется узкий управляемый поток и лишь 20 % времени флюктуации почвогрунта приводят к нарушению потока.

Произведена аппроксимация траектории движения потока почвогрунта (красная линия на фото 3) баллистической линией, полученной в результате решения уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту и испытывающего действие силы тяжести и сопротивления воздуха. Исходя из параметров решения баллистической задачи грунтомёт подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с. Дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере удаления от грунтомёта снижается плотность потока почвогрунта.

3.7. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости абсолютного значения скорости частиц почвогрунта

На основе анализа перемещения похожих фрагментов изображения потока почвогрунта от кадра к кадру построена картограмма распределения абсолютного значения скорости частиц почвогрунта (фото 4).

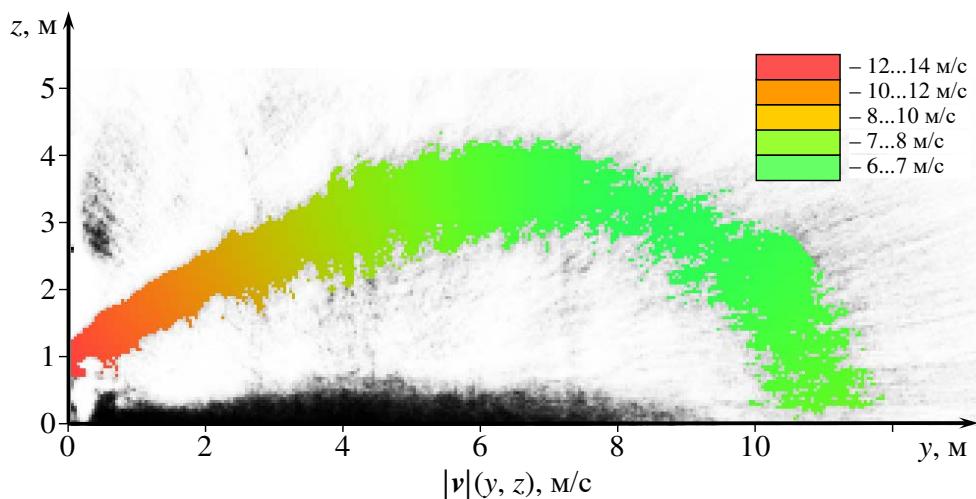


Фото 4. Картограмма распределения абсолютного значения скорости $|v|$ потока почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 4. Cartogram of the distribution of the absolute value of the soil flow speed $|v|$ in the vertical transverse plane YZ

По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую.

3.8. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости вектора скорости частиц почвогрунта

Тем же методом анализа движения фрагментов изображения получена картограмма распределения направления вектора скорости частиц почвогрунта (фото 5). Данная картограмма позволила определить угол оседания частиц почвогрунта на поверхность: он составляет около 73° к горизонту. При выбросе поток почвогрунта движется почти по горизонтальной траектории, а при достижении поверхности почвогрунт оседает ближе к вертикальной траектории, что благоприятствует тушению пожара.

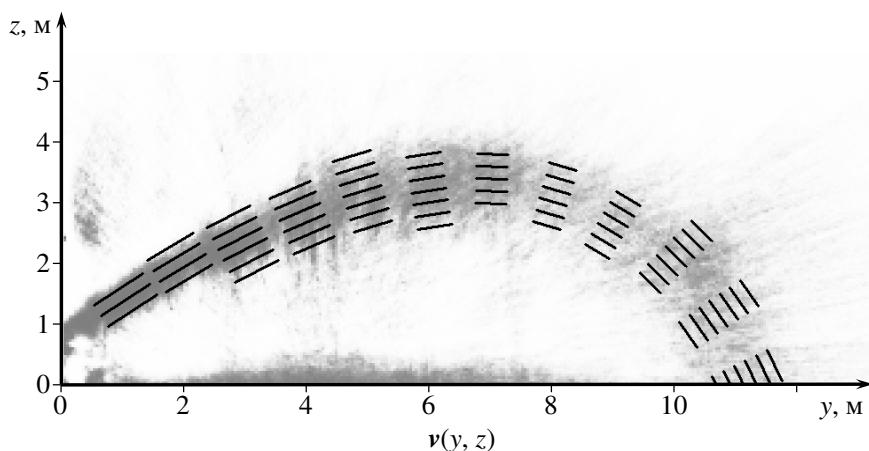


Фото 5. Картограмма распределения вектора скорости v частиц почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 5. Cartogram of the distribution of the velocity vector v of soil particles in the vertical transverse plane YZ

3.9. Эпюра углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) плотности метания почвогрунта

По картограмме распределения плотности потока почвогрунта построена эпюра углового распределения плотности метания почвогрунта в начальной части траектории (рисунок 1).

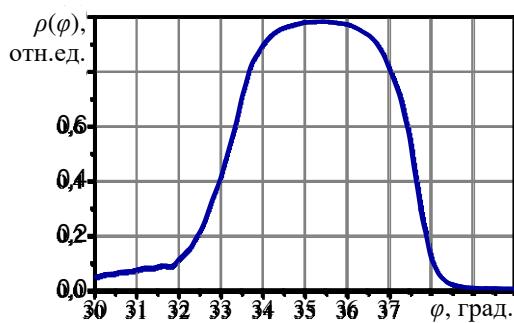


Рисунок 1. Эпюра углового распределения плотности метания почвогрунта

Figure 1. Diagram of the angular distribution of the throwing soil density

Эпюра имеет не гауссову форму, а практически прямоугольную форму, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока почвогрунта. Грунтомёт позволяет сформировать узкий поток с малым угловым разбросом 5° (от 33° до 38° на эпюре).

3.10. Эпюра углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) скорости метания почвогрунта

На основе картограммы распределения скорости частиц почвогрунта построена эпюра распределения скорости частиц почвогрунта в начальной части траектории (рисунок 2).

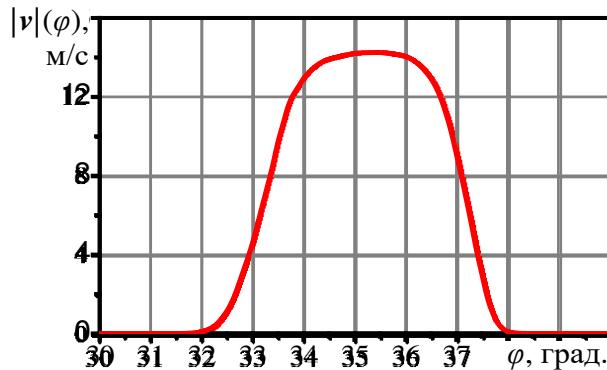


Рисунок 2. Эпюра углового распределения скорости частиц почвогрунта

Figure 2. Diagram of the angular distribution of the soil particles velocity

Эпюра имеет выраженную прямоугольную форму (не гауссову); в угловом диапазоне 34,3—36,5° скорость частиц составляет одну и ту же величину — 14. Эпюра несимметрична: больший разброс по скоростям имеет нижний фронт эпюры: это обусловлено оседанием мелких частиц (пыли) под основным потоком почвогрунта.

3.11. Эпюра распределения плотности оседания почвогрунта на поверхности

Для оценки кучности осаждения почвогрунта в месте тушения пожара построена эпюра распределения плотности потока почвогрунта перед осаждением на поверхность. Для этого картограмма распределения плотности потока почвогрунта усреднена по высоте 1 м над поверхностью (рисунок 3).

Как видно из эпюры, основная масса почвогрунта (около 60 %) оседает в полосе шириной 1,0 м (от -0,4 до 0,6 м), а из остальной массы почвогрунта около 30 % оседают в полосе шириной 2,0 м (от -0,8 до 1,2 м). Таким образом, грунтомёт формирует достаточно узкую полосу, что способствует тушению пожара.

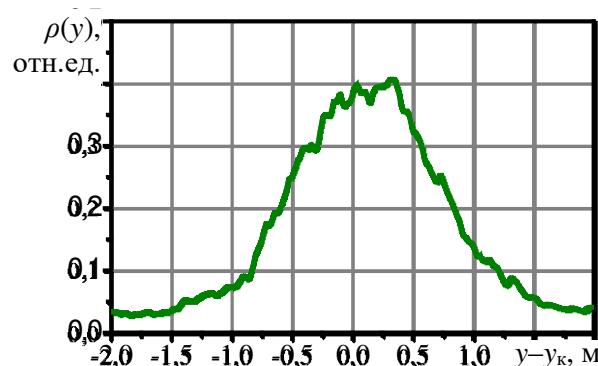


Рисунок 3. Эпюра распределения плотности потока почвогрунта перед осаждением на поверхность

Figure 3. Diagram of the distribution of soil flow density before its deposition on the surface

3.12. Характер движения потока почвогрунта в горизонтальной плоскости

Аналогичным образом получены характеристики потока почвогрунта в горизонтальной плоскости. На видеокадрах (фото 6) цвето-яркостным способом выделялся поток почвогрунта (фото 7).



Фото 6. Исходное изображение потока почвогрунта сверху, полученное с видеокамеры беспилотного воздушного судна

Photo 6. The original image of the flow of soil from above, obtained from the unmanned aerial vehicle video camera

По картограмме распределения плотности потока почвогрунта (фото 8) определено, что угол отклонения потока почвогрунта от поперечного направления составляет $15,4^\circ$.

Дисперсия (разброс по углам метания) потока в горизонтальной плоскости примерно на 20 % выше, чем в вертикальной плоскости, но в целом достаточно мала ($6-7^\circ$).



Фото 7. При увеличении цветовой насыщенности видеокадра поток почвогрунта может быть отделён от фона по цвето-яркостному принципу

Photo 7. Increasing color saturation of the video frame allows the soil flow to be separated from the background according to the color-brightness principle

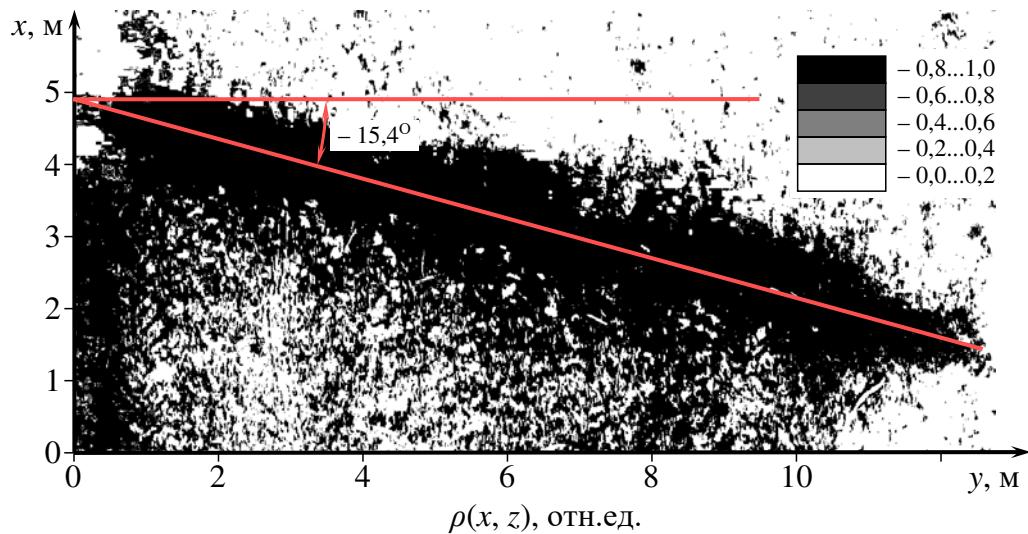


Фото 8. Картограмма распределения плотности ρ потока почвогрунта в горизонтальной плоскости XY (вид сверху)

Photo 8. Cartogram of the distribution of soil flow density ρ in the horizontal plane XY (top view)

Таким образом, с помощью изложенного выше математического аппарата и программной реализации получены характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтомётом: картограммы и эпюры распределения плотности и скорости потока в вертикальной поперечной и горизонтальной плоскостях. Результаты обработки экспериментальных

видеозаписей подтверждают, что грунтомёт имеет достаточно высокую дальность метания почвогрунта (10—20 м) и высокую кучность его осаждения (2—4 м).

4. Обсуждение и заключение

Произведён анализ эффективности пяти методов оптического распознавания потока почвогрунта на видеоряде, полученном в ходе полевых исследований. Цвето-яркостное отделение потока почвогрунта оказалось наиболее надёжным для фона, представляющего собой ветви деревьев лесного массива, движимые ветром. Разработаны методика и компьютерная программа для цвето-яркостного отделения потока почвогрунта, формируемого грунтомётом, от фона на кадрах видеоряда и определения характеристик потока почвогрунта. При помощи разработанного математического аппарата и программы реализации получены характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтомётом: картограммы и эпюры распределения плотности и скорости потока в вертикальной поперечной и горизонтальной плоскостях.

Результаты обработки экспериментальных видеозаписей подтверждают, что грунтомёт обладает достаточно высокими дальностью метания почвогрунта (10—20 м) и кучностью его осаждения (2—4 м). Исходя из формы траектории движения потока почвогрунта установлено, что грунтомёт подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с; дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую. Угол оседания частиц почвогрунта на поверхность составляет около 73° к горизонту. Несмотря на то, что при выбросе поток почвогрунта движется, скорее, горизонтально, чем вертикально, при достижении поверхности почвогрунт оседает, вероятнее всего, вертикально, чем горизонтально, что благоприятствует тушению кромки лесного низового пожара.

Эпюра углового распределения плотности потока почвогрунта имеет не гауссову форму, а практически прямоугольную форму, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока почвогрунта. Грунтомёт позволяет сформировать узкий поток с малым угловым разбросом — 5°. На начальной части траектории в угловом диапазоне 34,3—36,5° скорость частиц почвогрунта составляет одну и ту же величину — 14 м/с, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока.

Больший разброс по скоростям наблюдается в нижней части потока, что обусловлено оседанием мелких частиц (пыли) под основным потоком почвогрунта. Основная масса почвогрунта (около 60 %) оседает в полосе шириной 1,0 м (от -0,4 до 0,6 м), а из остальной массы почвогрунта около 30 % — в полосе шириной 2,0 м (от -0,8 до 1,2 м). Таким образом, грунтомёт формирует достаточно узкую полосу, что способствует тушению кромки лесного низового пожара. Поток почвогрунта отклонён назад на 15,4°

от перпендикулярного к траектории трактора направления. Грунтомёт формирует достаточно узкий поток почвогрунта не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости (угловой разброс не превышает 7°).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60041.

Список литературы

1. *Lysych M. N., Shabanov M. L., Bukhtoyarov L. D. Research of process overcoming obstacles by tillage tools // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (Forestry-2018)», Voronezh, 04—05 октября 2018 года. Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012045.*
2. *Shanin I. I., Shtondin A. A., Lysych M. N. Improvement of automation process of forest resources renewal using innovative landing material // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12—14 декабря 2018 года. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012091. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012091.*
3. *Драпалюк М. В., Коротких В. Н. Определение энергетических показателей лесного дискового плуга в лабораторных условиях // Лесотехнический журнал. 2011. № 1 (1). С. 21—28.*
4. *Драпалюк М. В. Математическое моделирование рабочего процесса рычажного корчевателя // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 75. С. 156—165.*
5. *Комбинированный лесопожарный грунтомёт и рекомендации по его применению / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров [и др.] // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 174—184.*
6. *Беляев Д. А., Федорченко И. С. Малогабаритный переносной грунтомёт // Экология. Риск. Безопасность. 2020. С. 332—333.*
7. *Есков Д. В., Внуков Е. В., Ескова В. С. Фрезерный грунтомёт для борьбы с природными пожарами на землях сельскохозяйственного назначения и высокозадернелых пастбищах // Аграрная наука — сельскому хозяйству. 2019. С. 32—34.*
8. *Перспективные направления совершенствования рабочих органов пожарных грунтомётов / Д. В. Есков [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2-2. С. 214—219.*
9. *Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire / M. A. Gnusov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 1001, no. 1. P. 012057.*
10. *Горячkin Б. С., Китов М. А. Компьютерное зрение // E-Scio. 2020. № 9 (48). С. 317—345.*
11. *Манюкова Н. В. Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда // Математические структуры и моделирование. 2015. № 4 (36). С. 123—128.*
12. *Гороховатский В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении. Харьков: Компания СМИТ, 2014.*
13. *Выделение границ на изображениях на основе модели энергетических признаков вейвлет-преобразования / М. П. Шлеймович [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 21. С. 103—107.*

14. *Манюкова Н. В.* Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда // Математические структуры и моделирование. 2015. №. 4 (36). С. 123—128.
15. *Форсайт Д. А., Понс Д.* Компьютерное зрение. Современный подход Computer Vision: A Modern Approach. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
16. *Шолле Ф.* Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
17. *Траск Э.* Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2019. 352 с.
18. *Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2020. 480 с.
19. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение Computer Vision. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
20. *Bishop Ch. M.* Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 738 р.
21. *Потапов А. С.* Распознавание образов и машинное восприятие. СПб.: Политехника, 2007. 548 с.
22. *Фомин Я. А.* Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с.
23. *Горелик А. Л., Скрипкин В. А.* Методы распознавания. 4-е изд. М.: Высш. шк., 2004. 262 с.
24. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
25. *Адамов В. Е., Вергилес Э. В.* Статистика промышленности: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2005. 326 с.
26. *Орлов А. И.* Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006. 671 с.
27. *Лукашин Ю. П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 415 с.
28. *Дуброва Т. А.* Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 133 с.
29. *Новиков А. С., Фокин А. Г., Чубукина Т. С.* Оптимизация распознавания объекта на изображении методом адаптивного движения сканирующего окна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 9. С. 203—209.
30. *Головко А. В.* Модели и методы обработки и передачи цифровой фото- и видеинформации для принятия решений в автоматизированных информационных системах: спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: Дис. ... канд. техн. наук. Николаев, 2012. 141 с.
31. Теория распознавания образов // Википедия (<https://ru.wikipedia.org/> (дата обращения: 18.05.2022). Текст: электронный.
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617714 РФ. Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом-полосопрокладывателем, на основе оптического распознавания: № 2022617207: заявл. 25.04.2022: опубл. 25.04.2022 / М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, В. В. Посметьев; заявитель: Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова».

References

1. Lysych M. N., Shabanov M. L., Bukhtoyarov L. D. Research of process overcoming obstacles by tillage tools. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the*

Forestry Complex (Forestry-2018)», Voronezh, 04—05 октября 2018 года. Voronezh, Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012045. doi: 10.1088/1755-1315/226/1/012045. (In Russ.)

2. Shanin I. I., Shtondin A. A., Lysych M. N. Improvement of automation process of forest resources renewal using innovative landing material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12—14 декабря 2018 года.* Novosibirsk, Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012091. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012091. (In Russ.)
3. Drapalyuk M. V., Korotkikh V. N. Determination of the energy performance of a forest disc plow in laboratory conditions. *Forestry journal*, 2011, no. 1 (1), pp. 21—28. (In Russ.)
4. Drapalyuk M. V. Mathematical modeling of the working process of a lever puller. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 75, pp. 156—165. (In Russ.)
5. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Goncharov P. E. [et al.]. Combined forest fire soil thrower and recommendations for its use. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 84, pp. 174—184. (In Russ.)
6. Belyaev D. A., Fedorchenko I. S. Small portable ground thrower. *Ecologia. Risk. Security*, 2020, pp. 332—333. (In Russ.)
7. Eskov D. V., Vnukov E. V., Eskova V. S. A milling ground thrower for fighting natural fires on agricultural lands and high-grass pastures. *Agrarian Science — agriculture*, 2019, pp. 32—34. (In Russ.)
8. Eskov D. V. [et al.]. Perspective directions for improving the working bodies of fire ground throwers. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 2-2, pp. 214—219. (In Russ.)
9. Grusov M. A. [et al.]. Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 1001, no. 1, pp. 012057.
10. Goryachkin B. S., Kitov M. A. Computer vision. *E-Scio*, 2020, no. 9 (48), pp. 317—345. (In Russ.)
11. Manyukova N. V. Computer vision as a means of extracting information from a video sequence. *Mathematical Structures and Modeling*, 2015, no. 4 (36), pp. 123—128. (In Russ.)
12. Gorokhovatsky V. A. *Structural analysis and intelligent data processing in computer vision*. Kharkov, SMITH Company, 2014. (In Russ.)
13. Shleimovich M. P. [et al.]. Edge detection in images based on the model of energy features of the wavelet transform. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2017, vol. 20, no. (21), pp. 103—107.
14. Manyukova N. V. Computer vision as a means of extracting information from a video sequence. *Mathematical Structures and Modeling*, 2015, no. 4 (36), pp. 123—128. (In Russ.)
15. Forsyth D. A., Pons J. *Computer vision. Modern Approach Computer Vision: A Modern Approach*. Moscow, Williams, 2004. 928 p. (In Russ.)
16. Chollet F. *Deep Learning with Python*. St. Petersburg, Piter, 2018. 400 p. (In Russ.)
17. Trask E. *Grokay deep learning*. St. Petersburg, Piter, 2019. 352 p. (In Russ.)
18. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep learning*. St. Petersburg, Peter, 2020. 480 p. (In Russ.)
19. Shapiro L., Stockman J. *Computer Vision*. Moscow, Binom, Knowledge Laboratory, 2006. 752 p. (In Russ.)
20. Bishop Ch. M. *Pattern recognition and machine learning*. New York, Springer, 2006. 738 p.
21. Potapov A. S. *Pattern recognition and machine perception*. St. Petersburg, Polytechnic, 2007. 548 p. (In Russ.)
22. Fomin Ya. A. *Pattern recognition: theory and applications*. 2nd ed. Moscow, FAZIS, 2012.

429 p. (In Russ.)

23. Gorelik A. L., Skripkin V. A. *Recognition methods*. 4th ed. Moscow, Higher school, 2004. 262 p. (In Russ.)
24. Osovsky S. *Neural networks for information processing*. Moscow, Finance and statistics, 2004. 344 p. (In Russ.)
25. Adamov V. E., Vergiles E. V. *Industry Statistics: Proc. Settlement*. Moscow, Finance and statistics, 2005. 326 p. (In Russ.)
26. Orlov A. I. *Applied statistics*. Moscow, Exam, 2006. 671 p. (In Russ.)
27. Lukashin Yu. P. *Adaptive methods of short-term forecasting of time series*. Moscow, Finance and statistics, 2003. 415 p. (In Russ.)
28. Dubrova T. A. *Statistical forecasting methods*. Moscow, UNITI-DANA, 2003. 133 p. (In Russ.)
29. Novikov A. S., Fokin A. G., Chubukina T. S. Optimization of object recognition in the image by the method of adaptive movement of the scanning window. *Izvestiya Tula State University. Technical science*, 2015, no. 9, pp. 203—209. (In Russ.)
30. Golovko A. V. *Models and methods of processing and transmission of digital photo and video information for decision-making in automated information systems: specialty 05.13.06 «Automation and control of technological processes and industries (by industry)»: Dissertation for the degree of candidate technical sciences*. Nikolaev, 2012. 141 p. (In Russ.)
31. Theory of pattern recognition. Wikipedia ([wikipedia.org](https://ru.wikipedia.org/)). Available at: <https://ru.wikipedia.org/> (accessed: 18.05.2022). Text. Image: electronic. (In Russ.)
32. Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Gnusov M. A., Posmetiev V. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2022617714 RF. A program for determining the characteristics of the flow of soil, formed by a soil thrower-strip-laying machine, based on optical recognition: No. 2022617207: Appl. 04/25/2022: publ. April 25, 2022; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov». (In Russ.)

© Гнусов М. А., Драпалюк М. В., Попиков П. И., Дручинин Д. Ю., Бухтояров Л. Д.,
Ступников Д. С., 2022

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6443

Статья

Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах

До Тuan Ань

*преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства
(Социалистическая Республика Вьетнам), anhdo.dhln@gmail.com*

Григорьев Глеб Владимирович

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), vtl-lta@mail.ru*

Каляшов Виталий Анатольевич

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru*

Новгородов Д'ялус Васильевич

*аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет
(Российская Федерация), novgorodov_dulus@mail.ru*

Григорьева Ольга Ивановна

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru*

Хитров Егор Германович

*доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com*

Получена: 4 июня 2022 / Принята: 12 декабря 2022 / Опубликована: 15 декабря 2022

Аннотация: При работе на склонах колёсные лесные машины (харвестеры, форвардеры, скиддеры) со встроенными в трансмиссию лебёдками обычно оснащаются съёмными гусеницами для повышения устойчивости и эффективности работы. При разработке горных склонов системами машин, включающими специальные самоходные лебёдки, даже на крутых склонах эффективно работают гусеничные валочно-пакетирующие машины. Поэтому

изучение процесса воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты горных лесосек является достаточно актуальным. Представленная работа посвящена экспериментальной проверке в лабораторных условиях положений ранее выполненных теоретических исследований. С учётом полученных результатов на настоящем этапе изучения планировалось проведение экспериментальных исследований, основываясь при моделировании на геометрическом подобии (1:15, коэффициент для пересчёта линейных параметров $k = 15$). Оригинальный лабораторный стенд был собран на кафедре «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных установлено, что отклонения теоретических значений несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 13 %. Отклонения теоретических значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 14 %.

Ключевые слова: экспериментальные исследования; горные леса; давление движителя; лесосечные работы; трелёвка; почвогрунты

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6443

Article

Methodology and results of experimental studies of the impact of forest machines with a tracked mover on the soils of slopes

Do Tuan An'

*lecturer, Vietnam National University of Forestry (Socialist Republic of Vietnam),
anhdo.dhln@gmail.com*

Gleb Grigorev

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering
University named after S. M. Kirov (Russian Federation), vtl-lta@mail.ru*

Vitalij Kalyashov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru*

D'ulus Novgorodov

*Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation),
novgorodov_dulus@mail.ru*

Olga Grigoreva

*Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering
University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru*

Egor Hitrov

*D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great Saint Petersburg
Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com*

Received: 4 June 2022 / Accepted: 12 December 2022 / Published: 15 December 2022

Abstract: When working on slopes, wheeled forest machines (harvesters, forwarders, skidders) with winches built into the transmission are usually equipped with removable tracks to improve stability and operating efficiency. When machine systems including special self-propelled winches operate on even on steep slopes, tracked feller-buncher machines work effectively. Therefore, to study the forest machines with caterpillar mover impact on the soils of mountain logging sites is quite relevant. The presented work is focused on laboratory experimental verification of previously performed

theoretical research results. Taking into account the obtained results, at the present stage of the research it was planned to perform experimental research based on geometrical simulation (1:15, the coefficient for recalculation of linear parameters $k=15$). The original laboratory testing unit was assembled at the Department "Technology and equipment of forestry complex" of the Arctic State Agrotechnological University. As a result of statistical processing of the experimental data obtained it was found that deviations of theoretical values of the soil bearing capacity under the influence of the tracked mover were within 13% and did not exceed the limits associated with errors in the experimental determination of this value. Deviations of theoretical values of permissible average pressure of the tracked mover on the ground were within 14% and did not exceed the limits related to the errors of experimental determination of this value.

Keywords: experimental research; mountain forests; mover pressure; logging; skidding; soils

1. Введение

В ходе теоретических исследований были получены зависимости для обоснования параметров гусеничных машин, работающих на крутых склонах. С их использованием проводится расчёт глубины образующейся колеи, тягово-цепных свойств движителей с учётом соотношения сторон пятна контакта с почвогрунтом, усилия, необходимого для буксировки машины лебёдкой на крутых склонах. Зависимости базируются на оценке несущей способности почвогрунта с учётом угла склона и среднего давления движителя. Важно отметить, что уравнения для оценки тягово-цепных свойств по зависимости глубины колеи от среднего давления движителя, с учётом несущей способности почвогрунта и геометрии пятна контакта, были подтверждены ранее. В этой связи необходима экспериментальная проверка:

1. Уравнений для расчёта несущей способности почвогрунта с учётом ослабления, вызванного отклонением результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.
2. Уравнений для расчёта допустимого среднего давления движителя гусеничной машины, работающей на склоне, с учётом его угла и геометрических параметров пятна контакта.

2. Материалы и методы

Лабораторные экспериментальные исследования выполнены на оригинальном стенде. Также использованы справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных выполнена по стандартным методикам.

3. Результаты

При разработке плана и методики экспериментальных исследований были внимательно изучены опыт и рекомендации коллег по полевым и лабораторным исследованиям воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек в равнинных условиях [1—7]. Также были проанализированы экспериментальные подходы к верификации математических моделей статического и динамического воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек в равнинных условиях [8—17]. Были учтены результаты исследований режимов работы современных трансмиссий лесных машин с гусеничным движителем [18—23], а также специфика работы лесных машин на склонах гор и сопок [24]. При этом при организации экспериментов результативно использованы положения теории подобия, что позволило снизить число трудоёмких полевых опытов и погрешность измерения экспериментальных величин за счёт использования более точного лабораторного оборудования. С учётом ранее полученных теоретических результатов [25], [26] на настоящем этапе исследования планировалось проведение экспериментальных

исследований в лабораторных условиях, основываясь при моделировании на геометрическом подобии.

Схема лабораторного стенда приведена на рисунке 1. Обоснование параметров модели осуществлялось исходя из геометрического подобия (1 : 15, коэффициент для пересчёта линейных параметров $k = 15$). Соотношение сторон пятна контакта, как было принято в теоретических исследованиях, для гусеничного движителя составляет $l/b = 5$. Максимальный вес груза Q изменялся с учётом площади штампа F так, чтобы обеспечить оценку максимального давления p не менее 0,3 МПа.

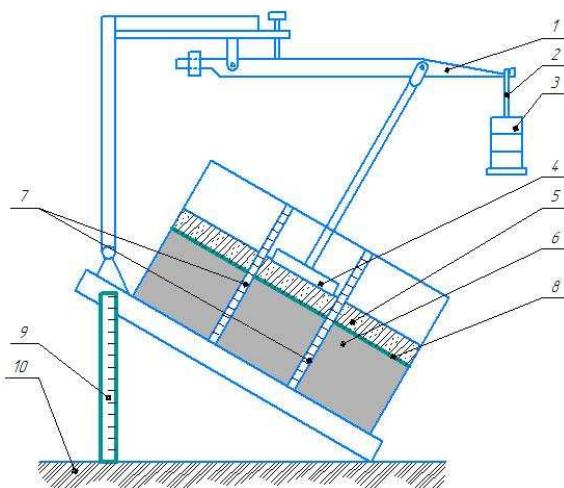


Рисунок 1. Лабораторный стенд для определения допустимого давления штампа и несущей способности почвогрунта на склоне: 1 — рычаг; 2 — навеска; 3 — груз; 4 — штамп; 5 — верхний слой (щепа); 6 — слой грунта; 7 — линейки; 8 — металлическая пластина; 9 — планка для выставления наклона платформы; 10 — основание (стол)

Figure 1. Laboratory testing unit for determining the permissible pressure of the die and the bearing capacity of the soil on the slope: 1 — lever; 2 — hinge; 3 — load; 4 — die; 5 — top layer (chips); 6 — soil layer; 7 — rulers; 8 — metal plate; 9 — bar for setting platform slope; 10 — base (table)

В таблице 1 указаны геометрические параметры лабораторных штампов, использованных в опытах, основные соотношения лабораторной модели и параметров движителя в натуральном масштабе. Опыты проведены в лаборатории условиях кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» АГАТУ. Предварительно почвогрунт на участках, где отбирали керны, классифицировали по категориям прочности на основе результатов зондирования. Для образцов почвогрунта по стандартным методикам определяли угол внутреннего трения φ и удельное сцепление частиц почвогрунта C по стандартной методике. Переменными факторами являлись:

- усилие, с которым штамп воздействовал на почвогрунт (определялось исходя из соотношения плеч рычага 1 : 10 и веса эталонного груза);
- геометрические параметры штампа (таблица 1);
- уклон наклона поверхности почвогрунта, на который воздействовал штамп ($\beta = 0^0$, 15^0 , 30^0).

Таблица 1. Основные параметры лабораторной модели**Table 1.** Main parameters of the laboratory model

Параметр	Штамп		
	1	2	3
k	15	15	15
$b_{\text{лаб}}$, м	0,03	0,04	0,05
$l_{\text{лаб}}$, м	0,15	0,2	0,25
$F_{\text{лаб}}$, м ²	0,0045	0,008	0,0125
Q_{max} , Н	140	240	380
b , м	0,45	0,6	0,75
F , м ²	1,0125	1,8	2,8125
p_{max} , МПа	0,311	0,300	0,304

Толщина слоя почвогрунта $H_{\text{пг}}$ составляла не менее 40 см, чтобы обеспечить условие $H_{\text{пг}} \gg 2b$. Ширина лотка с грунтом $B_{\text{пг}}$ составляла 30 см, таким образом, $B_{\text{пг}} \gg 2b$. Длина лотка $L_{\text{пг}}$ составляла 60 см.

Экспериментальный грунт 6 требуемого объёма размещали в лотке (см. рисунок 1). Вес эталонного груза 3 через рычаг 1 передавался на штамп 4. Далее нагрузка прикладывалась ступенями, в зависимости от категории прочности почвогрунта. По результатам измерения перемещений штампа $h_{\text{лаб},i}$ в зависимости от среднего давления p_i для экспериментального почвогрунта получали зависимости $h_{\text{лаб}}(p)$, по которым, в свою очередь, оценивали значения допустимого давления p_{adm} и несущей способности p_s (пример на рисунке 2).

Для определения p_{adm} , p_s использовали линейную интерполяцию (для p_{adm} по двум соседним узлам при $h_{\text{лаб},i} \leq 0,2$ м, $h_{\text{лаб},i+1} > 0,2$ м; для p_s по узлам $h_{\text{лаб},i-2}$, $h_{\text{лаб},i-1} \leq 2B$ м при $h_{\text{лаб},i} > 2B$):

$$p_{\text{adm}} = \frac{p_{i+1} \left(\frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i} \right) - p_i \left(\frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i+1} \right)}{h_{\text{лаб},i+1} - h_{\text{лаб},i}}, \quad (1)$$

$$p_s = \frac{p_{i-1} \left(\frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-2} \right) - p_{i-2} \left(\frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-1} \right)}{h_{\text{лаб},i-1} - h_{\text{лаб},i-2}}. \quad (2)$$

Проверка согласования результатов теоретических и экспериментальных исследований проводилась с учётом максимальных абсолютных погрешностей измерения экспериментальных величин:

$$\overline{\Delta_{p\text{adm}}} = \left| \frac{\partial p_{\text{adm}}}{\partial C} \right| \overline{\Delta_C} + \left| \frac{\partial p_{\text{adm}}}{\partial \varphi} \right| \overline{\Delta_\varphi} + \left| \frac{\partial p_{\text{adm}}}{\partial b} \right| \overline{\Delta_b} + \left| \frac{\partial p_{\text{adm}}}{\partial \beta} \right| \overline{\Delta_\beta}, \quad (3)$$

$$\overline{\Delta_{ps}} = \left| \frac{\partial p_s}{\partial C} \right| \overline{\Delta_C} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \right| \overline{\Delta_\varphi} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial b} \right| \overline{\Delta_b} + \left| \frac{\partial p_s}{\partial \beta} \right| \overline{\Delta_\beta}, \quad (4)$$

где верхний штрих означает максимальную границу погрешности (половина цены деления измерительного прибора), интервал изменения C, φ, b, β изменяется в соответствии с физико-механическими свойствами почвогрунта в опыте и условиями его проведения.

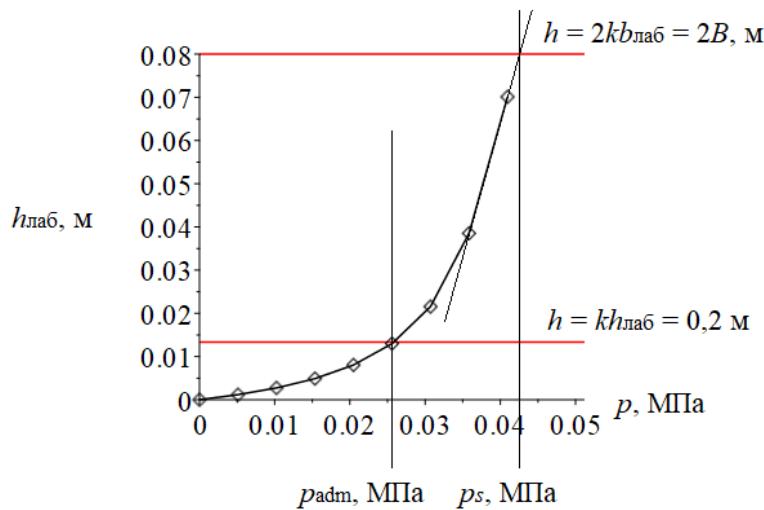


Рисунок 2. Кривая осадки лабораторного штампа

Figure 2. Deposition curve of the laboratory die

В таблице 2 приведены результаты экспериментов по определению допустимого давления p_{adm} и несущей способности p_s образцов почвогрунта, отнесённого к III категории прочности (слабонесущий почвогрунт). В таблице также приведены результаты расчёта теоретических значений p_s и p_{adm} [25], [26].

Аналогичные сведения для почвогрунта II (средней прочности) и I (прочный почвогрунт) категорий прочности приведены в таблицах 3, 4. С учётом изменения физико-механических свойств почвогрунта по формулам (3), (4) получены верхние оценки абсолютной

и относительной погрешностей измерения экспериментальных величин p_s , p_{adm} , представленные в таблице 5. При расчёте приняты погрешности определения $\overline{\Delta}_c = 0,5$ кПа, $\overline{\Delta}_\varphi = 0,5^\circ$, $\overline{\Delta}_\beta = 2,5^\circ$, $\overline{\Delta}_b = 15*0,0005$ м.

Согласование теоретических и экспериментальных данных удобно проиллюстрировать графиками. На рисунках 3—14 представлены результаты сопоставления расчётных и опытных значений допустимого среднего давления движителя и несущей способности для трёх исследованных категорий почвогрунтов. Пунктирными линиями на графиках нанесены границы изменения величин с учётом полученных выше верхних оценок погрешностей определения экспериментальных значений.

Таблица 2. Результаты определения физико-механических и прочностных свойств слабонесущего почвогрунта и допустимого среднего давления штампа (III категория прочности)

Table 2. Physical-mechanical and strength properties of weakly bearing soil and permissible average die pressure (strength category III)

№	C , кПа	φ , $^\circ$	B , м	β , $^\circ$	$p_{adm}^{\text{эксп}}$, кПа	$p_{adm}^{\text{теор}}$, кПа	$p_s^{\text{эксп}}$, кПа	$p_s^{\text{теор}}$, кПа
1	5,9	12	0,75	15	26,12	27,16	50,52	49,25
2	5,5	12	0,6	0	25,08	27,03	50,3	49,45
3	6,7	12	0,45	15	24,53	26,62	49,58	53,43
4	6,6	12	0,6	0	27,28	31,32	57,77	52,69
5	5,7	12	0,6	15	23,47	24,8	46,39	40,95
6	6	12	0,6	0	31,23	28,98	53,7	47,21
7	8	13	0,75	30	33,94	32,54	59,88	67,67
8	5,8	12	0,45	30	20,17	20,66	39,08	34,27
9	6,2	12	0,75	30	25,74	24,8	46,4	44,76
10	6,8	13	0,45	0	28,81	32,28	59,43	61,1
11	5,5	12	0,6	15	23,98	24,1	45,17	45,62
12	9,1	13	0,6	15	38,23	39,15	71,25	79,57
13	8,6	13	0,6	15	35,24	37,31	68,08	69,18
14	8	13	0,75	30	34,37	32,54	59,88	55,37
15	8,6	13	0,45	15	39,56	35,32	64,67	70,38
16	9,1	13	0,75	30	31,45	36,12	66,04	61,76
17	7,4	13	0,6	0	41,66	36,95	67,47	65,14

Таблица 3. Результаты определения физико-механических и прочностных свойств почвогрунта средней прочности и допустимого среднего давления штампа (II категория прочности)

Table 3. Physical-mechanical and strength properties of the soil of average strength and permissible average die pressure (strength category II)

№	C , кПа	φ , °	B , м	β , °	$p_{adm}^{\text{эксп}}$, кПа	$p_{adm}^{\text{теор}}$, кПа	$p_s^{\text{эксп}}$, кПа	$p_s^{\text{теор}}$, кПа
1	13	14	0,45	30	44,89	47,83	86	85,15
2	15	15	0,6	0	74,58	77,41	135,3	140
3	16	15	0,75	0	83,06	85,16	148,1	142,1
4	12	14	0,45	30	44,15	44,4	80,19	75,08
5	15	15	0,6	30	64,57	60,03	106,5	113,2
6	16	15	0,6	0	74,89	82,08	143	151,6
7	13	14	0,75	0	69,36	66,74	117,7	122,1
8	13	14	0,6	30	53,56	49,89	89,49	87,11
9	16	15	0,45	15	67,34	70,1	123,3	126,1
10	16	15	0,6	0	87,7	82,08	143	154,6
11	13	14	0,75	30	52,96	51,96	92,97	92,38
12	18	15	0,6	15	80,6	81,15	141,5	140,8
13	18	15	0,45	30	68	68,52	120,6	110,6
14	15	15	0,75	15	65,88	71,42	125,4	119,5

Таблица 4. Результаты определения физико-механических и прочностных свойств прочного почвогрунта и допустимого среднего давления штампа (I категория прочности)

Table 4. Physical-mechanical and strength properties of firm soil and permissible average die pressure (I strength category)

№	C , кПа	φ , °	B , м	β , °	$p_{adm}^{\text{эксп}}$, кПа	$p_{adm}^{\text{теор}}$, кПа	$p_s^{\text{эксп}}$, кПа	$p_s^{\text{теор}}$, кПа
1	22	17	0,75	15	109,6	112,8	192,9	202,2
2	24	17	0,6	15	118,2	118,4	202	201,4
3	20	17	0,45	0	112,4	109	186,9	176,5
4	21	17	0,6	15	101,1	104,6	179,7	176,3
5	21	17	0,6	0	113,3	118,2	201,8	188,8
6	21	17	0,45	0	113,8	114,2	195,3	181,2
7	22	17	0,75	30	102,8	98,11	169,2	166,1

№	C , кПа	φ , °	B , м	β , °	$p_{adm}^{эксп}$, кПа	$p_{adm}^{теор}$, кПа	$p_s^{эксп}$, кПа	$p_s^{теор}$, кПа
8	22	17	0,75	15	111,1	112,8	192,9	184,1
9	23	17	0,45	0	128	124,6	212	224,6
10	22	17	0,45	0	114	119,4	203,6	189,4
11	23	17	0,45	15	103,6	110,2	188,8	185,2
12	23	17	0,6	0	135,4	128,7	218,5	230,5
13	22	17	0,75	30	90,77	98,11	169,2	168,8
14	22	17	0,6	15	100,9	109,2	187,1	186,7
15	22	17	0,75	15	118	112,8	192,9	206,5

Таблица 5. Верхние оценки погрешностей экспериментального определения допустимого среднего давления штампа и несущей способности почвогрунта

Table 5. Upper estimates of errors in the experimental determination of the allowable average die pressure and bearing capacity of the soil

Категория почвогрунта	$\overline{\Delta}_{p_{adm}}$, кПа	$\overline{\delta}_{p_{adm}}$, %	$\overline{\Delta}_{p_s}$, кПа	$\overline{\delta}_{p_s}$, %
III (слабый)	6,794	13,90	7,963	13,04
II (средней прочности)	10,80	9,332	11,46	8,791
I (прочный)	14,30	7,735	14,64	7,303

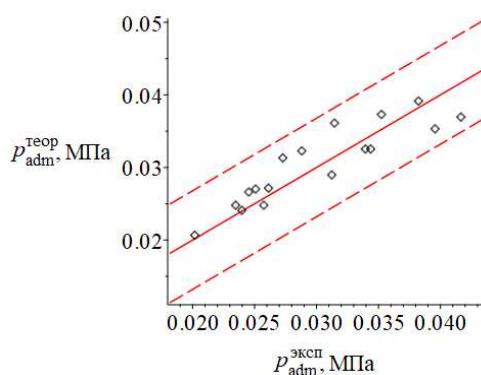


Рисунок 3. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на слабонесущий почвогрунт (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 3. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on weak soil (limits of variation in absolute values)

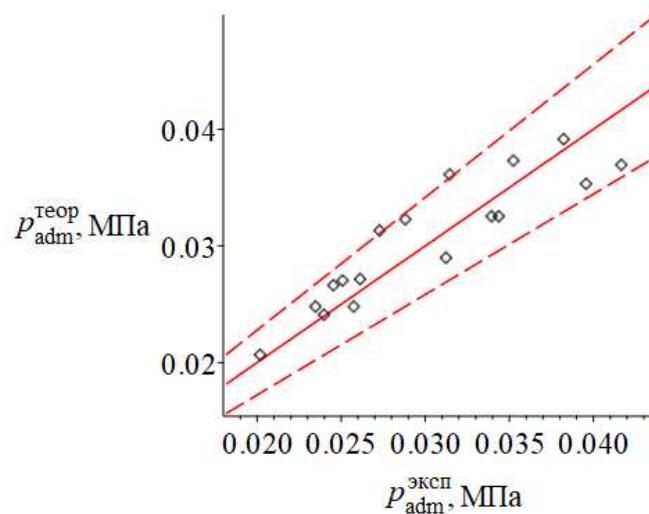


Рисунок 4. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на слабонесущий почвогрунт (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 4. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on weak soil (limits of variation in relative values)

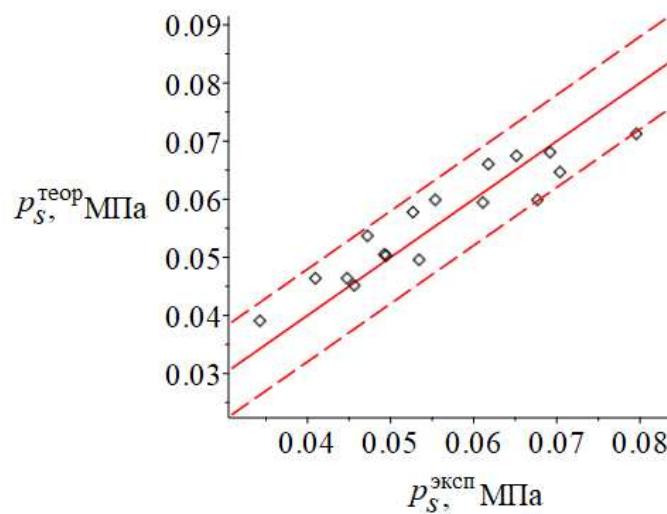


Рисунок 5. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности слабонесущего почвогрунта (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 5. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of weak soil (limits of variation in absolute values)

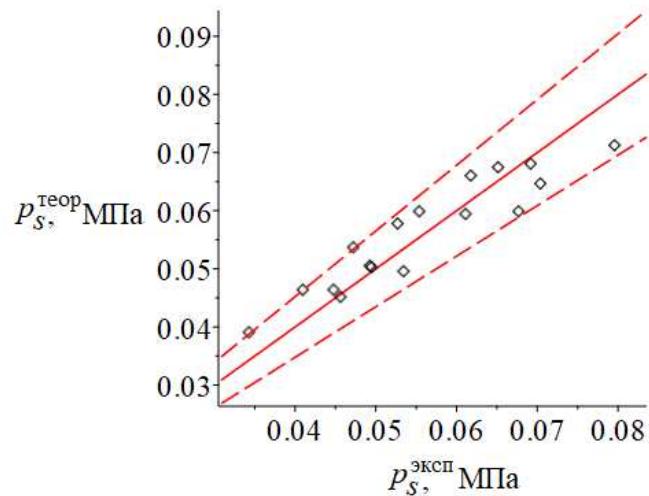


Рисунок 6. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности слабонесущего почвогрунта (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 6. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of weak soil (boundaries of variation in relative values)

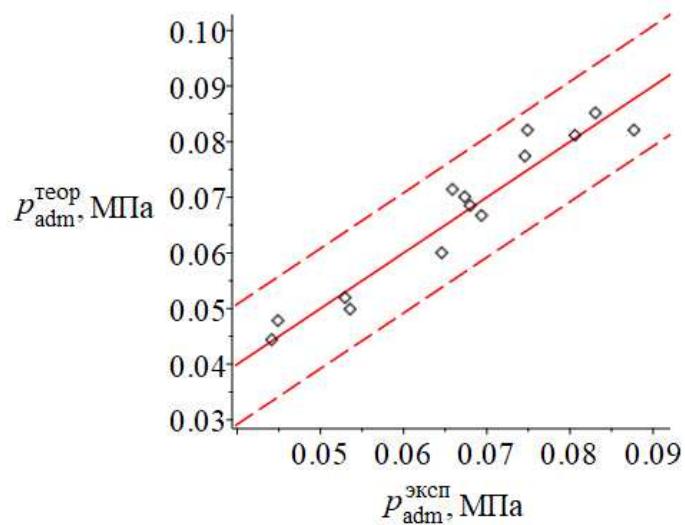


Рисунок 7. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт средней прочности (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 7. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on the soil of average strength (limits of variation in absolute values)

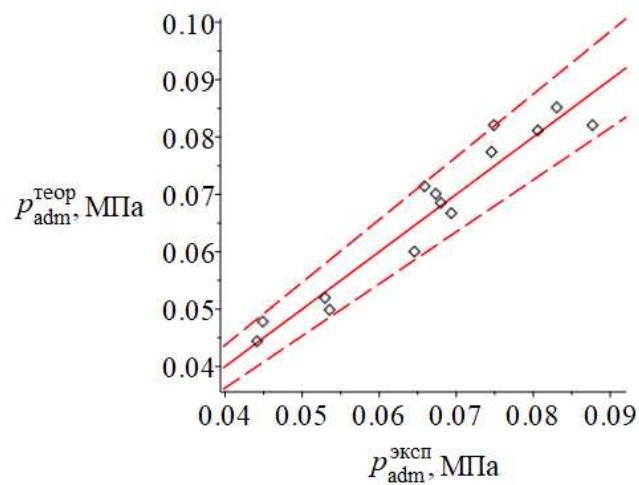


Рисунок 8. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт средней прочности (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 8. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on the soil of average strength (limits of variation in relative values)

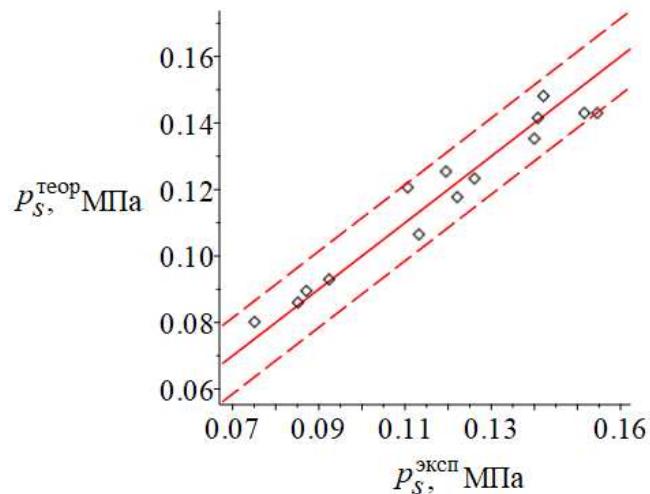


Рисунок 9. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта средней прочности (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 9. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of the soil of average strength (limits of variation in absolute values)

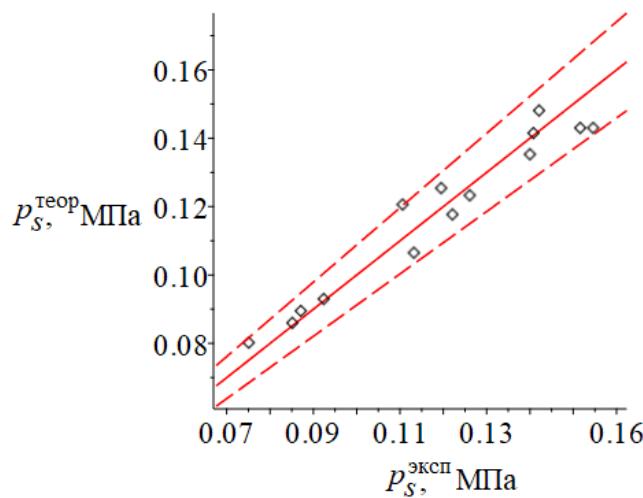


Рисунок 10. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта средней прочности (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 10. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of the soil of average strength (limits of variation in relative values)

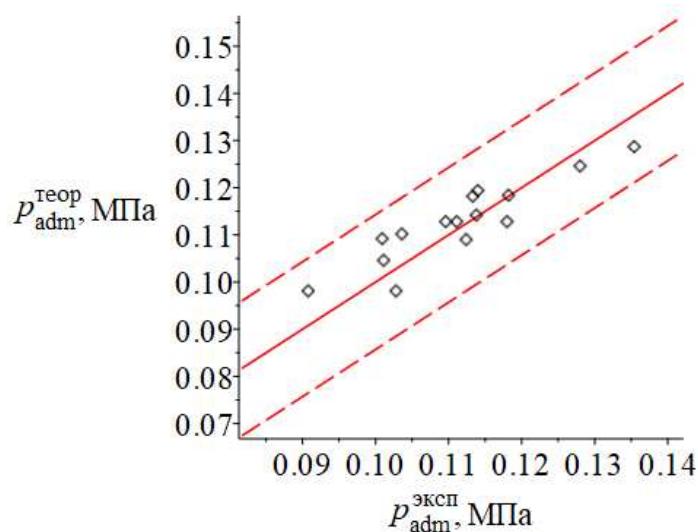


Рисунок 11. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на прочный почвогрунт (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 11. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on firm soil (limits of variation in absolute values)

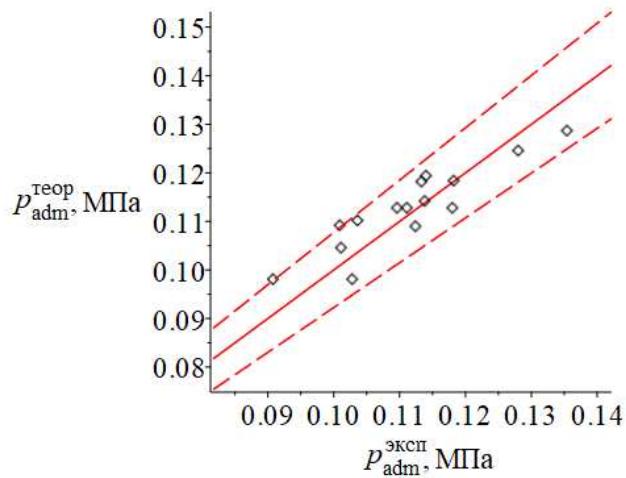


Рисунок 12. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на прочный почвогрунт (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 12. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible average pressure of the tracked mover on firm soil (limits of variation in relative values)

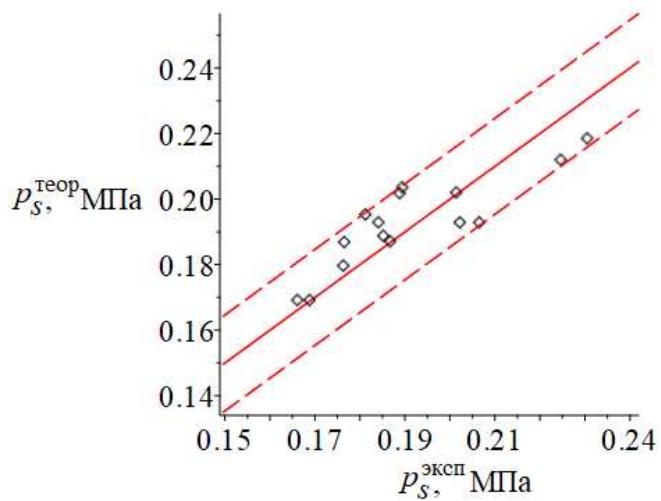


Рисунок 13. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности прочного почвогрунта (границы варьирования в абсолютных величинах)

Figure 13. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of firm soil (limits of variation in absolute values)

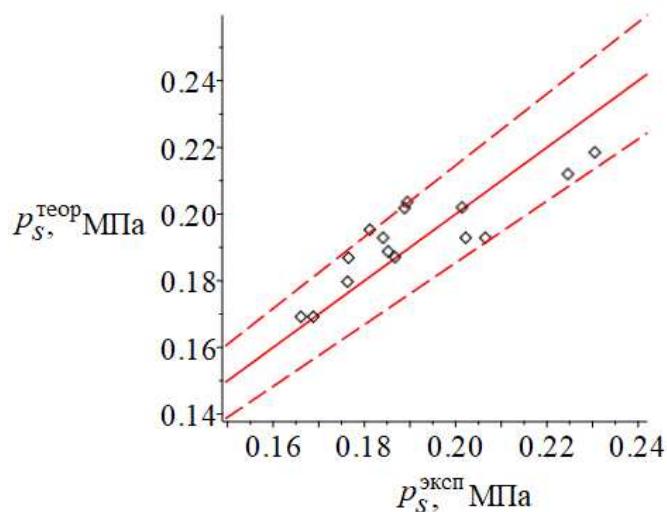


Рисунок 14. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности прочного почвогрунта (границы варьирования в относительных величинах)

Figure 14. Comparison of theoretical and experimental values of the bearing capacity of firm soil (limits of variation in relative values)

4. Обсуждение и заключение

Сопоставление графических данных на рисунках 3—14, а также числовых данных, приведённых в таблицах 3—5, показывает:

1. Отклонения теоретических значений несущей способности почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 13 %.
2. Отклонения теоретических значений допустимого среднего давления гусеничного движителя на почвогрунт не превышают границ, связанных с погрешностями экспериментального определения данной величины. Отклонения находятся в пределах 14 %.

Исследование выполнено в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», а также на средства гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rsccf.ru/project/22-26-00009/>.

Список литературы

1. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трёхвальной системы с волоком / И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова, А. И. Жукова [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47—54.
2. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, А. А. Пельмский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77—80.
3. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта / М. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, В. А. Лухминский [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7, № 4 (28). С. 167—174.
4. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66—71.
5. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры почвогрунтов криолитозоны на их физико-механические свойства / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 4 (40). С. 197—207.
6. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учётом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просухих, С. Е. Рудов [и др.] // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 94—124.
7. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev [et al.] // Eur. Asian Journal of Bio Sciences. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 277—287.
8. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта / И. В. Григорьев, О. А. Кунинская, М. Ф. Григорьев [и др.] // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвящённая 75-летию Владимира Николаевича Врагова: Тез. докл. /Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). Якутск, 2020. С. 144.
9. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds / S. Rudov, I. Grigorev, O. Kunickaya [et al.] // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Vol. 28, no. 9. P. 179—197.
10. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10, no. 1. P. 2052—2071.
11. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 61—75.
12. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S. E. Rudov, I. V. Grigorev, O. A. Kunickaya [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 25, no. Suppl. 2. P. 191—205.
13. Theoretical studies of dynamic soil compaction by wheeled forestry machines / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 4. P. 3—13.
14. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Prosuzhikh [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 95—109.

15. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 439—447.
16. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas / I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, E. A. Tikhonov [et al.] // Journal of Terramechanics. 2022. Vol. 101. P. 1—9.
17. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil / I. V. Grigorev, A. M. Burgonutdinov, V. A. Makuev [et al.] // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. Vol. 19, no. 3. P. 2935—2949.
18. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles / R. Dobretsov, I. Grigorev, E. Tikhonov [et al.] // International Review of Automatic Control. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 172—178.
19. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Куницкая О. А. Шасси гусеничного трелёвочного трактора с «диагональной» системой управления поворотом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 42—48.
20. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 11. С. 29—35.
21. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Квазибесступенчатые трансмиссии для лесных гусеничных машин // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 1. С. 68—77.
22. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. С. 57—58.
23. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10.
24. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.
25. Теоретическое обоснование допустимого среднего давления на грунт движителя лесной машины, работающей на склоне / До Тuan Ань, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 72—77.
26. Оценка тягово-цепепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / До Тuan Ань, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78—84.

References

1. Grigorev I. V., Tsygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Yesin G. Y. Planning the experiment in the study of interaction skidding system with dragline. *Bulletin of Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2011, no. 2, pp. 47—54. (In Russ.)
2. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Pelymsky A. A., Khitrov E. G., Khakhina A. M. Experimental determination of stress relaxation time of forest soil. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137), pp. 77—80. (In Russ.)
3. Dmitrieva M. N., Grigorev I. V., Lukhminsky V. A., Kazakov D. P., Khakhina A. M. Experimental studies of cone index and physical and mechanical properties of waterlogged soil. *Forest Engineering Journal*, 2017, vol. 7, no. 4 (28), pp. 167—174. (In Russ.)

4. Burmistrova O. N., Teterevleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Methodology and results of experimental research of wheeled vehicles interaction on low pressure pneumatics with forest soils. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 1 (45), pp. 66—71. (In Russ.)
5. Rudov S. E., Shapiro V. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Storodubtseva T. N. Results of experimental studies of cryolithozone soils temperature effect on their physical and mechanical properties. *Forest Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4 (40), pp. 197—207. (In Russ.)
6. Burmistrova O. N., Prosuhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Experimental research of forwarder productivity taking into account its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of the soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94—124. (In Russ.)
7. Grigorev M. F., Grigoreva A. I., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Savvinova M. S., Sidorov M. N., Tomashhevskaya E. P., Burtseva I. A., Zakharova O. I. Experimental findings in forest soil mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 277—287.
8. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Modeling of process of dynamic compaction of soil. *IX International Conference on Mathematical Modelling, devoted to 75th anniversary of Vladimir Nikolaevich Vragov: Theses of reports*. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk, 2020, p. 144. (In Russ.)
9. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Mueller O., Hertz E., Chemshikova Y., Teterevleva E., Knyazev A. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2019, vol. 28, no. 9, pp. 179—197.
10. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 2052—2071.
11. Rudov S. E., Voronova A. M., Chemshikova J. M., Teterevleva E. V., Kruchinin I. N., Dondokov Yu. Zh., Khaldeeva M. N., Burtseva I. A., Danilov V. V., Grigorev I. V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61—75.
12. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Druzyanova V. P., Ivanov A. K., Okhlopkova M. K., Pankov V. Y., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Borovikov R. G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, no. Suppl. 2, pp. 191—205.
13. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical studies of dynamic soil compaction by wheeled forestry machines. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 3—13.
14. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhikh A., Kruchinin I., Shakiryanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 95—109.
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, vol. 19, no. 2, pp. 439—447.

16. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tikhonov E. A., Gerts E. F., Druzyanova V. P., Timokhova O. M., Ivanov V., Kruchinin I. N. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas. *Journal of Terramechanics*, 2022, vol. 101, pp. 1—9.
17. Grigorev I. V., Burgonutdinov A. M., Makuev V. A., Tikhonov E. A., Shvetsova V. V., Timokhova O. M., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 2935—2949.
18. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles. *International Review of Automatic Control*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172—178.
19. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Chassis of caterpillar skidder tractor with «diagonal» turn control system. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 1, pp. 42—48. (In Russ.)
20. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Adaptation of the principle of low-frequency pulse control of turning to transmissions of forestry and transport-traction crawler machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 11, pp. 29—35. (In Russ.)
21. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Quasi-stage transmissions for forestry tracked machines. *Forestry Bulletin. Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 68—77. (In Russ.)
22. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Prospective transmissions of forest tracked machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Petrozavodsk, Publishing House of PetrSU, 2018, pp. 57—58. (In Russ.)
23. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increase mobility of tracked and wheeled machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2019, no. 11, pp. 4—10. (In Russ.)
24. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of the operation of wheeled forest machines in complex soil and terrain conditions. *Forest engineering. materials of scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)
25. Do Tuan Anh, Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Khitrov E. G. Theoretical substantiation of permissible average pressure on the ground of forest machine propeller operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 72—77. (In Russ.)
26. Do Tuan Anh, Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Evaluation of traction and coupling properties of forest tracked machine propulsor operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 78—84. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6523

УДК 681.5

Статья

Разработка системы раннего обнаружения лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта

Вычерова Наталия Романовна

аспирантка, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (Российская Федерация), nvycherova@ugtu.net

Будевич Евгений Артурович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (Российская Федерация), ebudevich@ugtu.net

Беляев Андрей Эдуардович

кандидат технических наук, доцент, ООО «Газпром недра» ПФ «Вуктылгазгеофизика» (Российская Федерация), belandre@yandex.ru

Получена: 21 сентября 2022 / Принята: 19 декабря 2022 / Опубликована: 22 декабря 2022

Аннотация: Для большинства стран мира лесные пожары продолжают оставаться серьёзной проблемой, которой посвящено огромное количество отечественных и зарубежных публикаций. Кроме того, накоплен многосторонний опыт организации борьбы с пожарами. Природные пожары — глобальная проблема всего мира. Ежегодно лесные и торфяные пожары наносят немалый урон экономике нашей страны и окружающей природной среде: приводят к серьёзному и долговременному ухудшению состояния водосборных бассейнов, т. к. продукты горения смываются в реки и загрязняют их; снижают рекреационную и научную ценность ландшафтов; в результате пожаров гибнут массивы ценных древесных пород, дикие животные, сгорают жилые дома и другие постройки. При наличии сильного ветра пожары могут широко распространяться на соседние торфяные и лесные массивы, а также на населённые пункты. Особую опасность представляют лесные и торфяные пожары на территориях, загрязнённых радионуклидами. Пожар в таких зонах становится причиной миграции радионуклидов, в результате чего не только население данного района, но и других, более отдалённых территорий подвергается дополнительному

облучению. Загрязнение окружающей среды в результате штатных выбросов объектов хозяйственной деятельности, транспорта, пожаров и аварий ухудшает экологическое состояние среды обитания, причиняет вред здоровью людей. Экологическая опасность пожаров прямо обусловлена изменением химического состава, температуры воздуха, воды и почвы, а косвенно — и других параметров окружающей среды. В настоящее время существует множество способов борьбы с ними. В основном все они направлены на снижение ущерба, причинённого пожарами, с использованием методов их раннего обнаружения. По подсчётам Рослесхоза, в среднем размер ущерба от лесных пожаров в год составляет порядка 20 млрд руб., из них от 3 до 7 млрд руб. — ущерб лесному хозяйству (потери древесины). В статье рассматривается использование беспилотных летательных аппаратов для регулярного патрулирования потенциально опасных зон распространения огня с использованием преимуществ искусственного интеллекта и возможностью самостоятельной обработки полученной информации. Это позволяет БПЛА использовать методы компьютерного видения для обнаружения дыма или огня на основе информации, получаемой от их видеокамер.

Ключевые слова: дрон; компьютерное видение; распознавание образов методом опорных векторов

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6523

Article

Development of a forest fire early detection system using Unmanned aerial vehicles and artificial intelligence

Nataliya Vycherova

*Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation),
nvycherova@ugtu.net*

Evgeny Budevich

*Ph. D. in engineering, associate professor, Ukhta State Technical University
(Russian Federation), ebudevich@ugtu.net*

Andrey Belyaev

*Ph. D. in engineering, associate professor, Gazprom Nedra PF
«Vuktylgazgeofizika» LLC (Russian Federation), belandre@yandex.ru*

Received: 21 September 2022 / Accepted: 19 December 2022 / Published: 22 December 2022

Annotation: For most countries of the world forest fires continue to be a serious problem. A huge number of domestic and foreign publications are focused on the problems of fires and many-sided experience in organizing fire fighting has been accumulated. Wildfires are a global problem throughout the world. Every year, forest and peat fires cause considerable damage to the economy of our country and the natural environment: they lead to a serious and long-term deterioration in the condition of watersheds, as combustion products are washed into rivers and pollute them; reduce the recreational and scientific value of landscapes; as a result of fires, many valuable tree species and wild animals perish; houses and other buildings burn down. Strong winds might make fires spread widely to neighboring peat and forest areas as well as to settlements. Of particular danger are forest and peat fires in areas contaminated with radionuclides. A fire in such zones causes the migration of radionuclides, as a result of which not only the population of this region, but also other, more distant territories, is exposed to additional radiation. Pollution of the environment as a result of regular emissions from economic activities, transport, fires and accidents worsens the ecological state of the environment and causes harm to human health. The environmental hazard of fires is directly due to changes in the chemical composition

and temperature of air, water and soil, and indirectly to other environmental parameters. Currently, there are many ways to deal with fires. Basically, methods are aimed at reducing the damage caused by fires by their early detection. According to Rosleskhoz estimates, the average amount of damage from forest fires per year is about 20 billion rubles, of which from 3 to 7 billion is damage to forestry (loss of wood). The article discusses the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for regular patrolling of potentially dangerous fire zones using the advantages of artificial intelligence (AI) and the possibility of independent processing of the information obtained. This allows UAVs to use computer vision techniques to detect smoke or fire based on the information they receive from their video cameras.

Keywords: drone; computer vision; pattern recognition by the method of support vectors

1. Введение

Только в Российской Федерации лесами покрыто почти две трети территории, что на 2021 г. составляет 1,019 млрд га. Из них ежегодно пожарами охвачено от 500 тыс. до 3,5 млн га. С 2019 г. ежегодно высаживается около 1 млн га саженцев за счёт реализации федерального проекта «Сохранение лесов». При этом в Российской Федерации в год регистрируется от 9 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких миллионов гектаров [8].

Количество лесных пожаров за последние десятилетия в мире несколько снизилось, что объясняется ужесточением предпринимаемых мер и внедрением методов их раннего обнаружения. Однако лесные пожары продолжают наносить колоссальный ущерб во всём мире.

Наиболее значимым фактором в борьбе с лесными пожарами является максимально раннее обнаружение признаков огня и быстрота реагирования противопожарных служб. Для раннего обнаружения лесных пожаров предлагается использовать современные технологии: использование двух типов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — дронов с неподвижным крылом («самолётного» типа) и мультироторных дронов (мультикоптеров).

2. Методы и принципы исследования

2.1. Основы системы для раннего обнаружения лесного пожара

В основе любого прогноза лежит непрерывное наблюдение за множеством специфических параметров. Наша задача состоит в сокращении количества наблюдаемых параметров, включая зависящие от погодных условий, что позволит уменьшить ошибки. В то же время отобранные параметры должны с высокой точностью коррелироваться с риском возникновения пожара. Для этого целесообразно использовать следующие параметры:

- минимальная суточная температура T_{\min} ;
- максимальная суточная температура T_{\max} ;
- среднесуточная влажность;
- суточная солнечная радиация;
- среднесуточная скорость ветра;
- суммарное количество осадков.

Указанные параметры используются для прогноза пожароопасности методом опорных векторов (SVM — Support Vector Machines).

Метод опорных векторов заключается в нахождении точек данных разных классов и рисовании границы между ними. Такие выбранные точки данных называются опорными векторами, а границы — гиперплоскостями. Алгоритмы используют набор математических функций — ядра. Функция ядра состоит в том, чтобы принимать данные в качестве входных

и преобразовывать их в требуемую форму. При этом рассматривается каждая пара точек данных до тех пор, пока не найдётся ближайшая пара из разных классов и будет проведена прямая линия (или плоскость) на полпути между ними. Если входные данные линейно разделимы, то решение для гиперплоскости является простым. Но на практике часто области классификации пересекаются, и ни одна прямая плоскость не может выступать в качестве границы. Когда данные линейно неразделимы, методом опорных векторов отображают данные в пространстве более высокой размерности (N -мерного) — пространстве признаков. Эта задача может быть решена с использованием различных нелинейных отображений: полиномиальных, сигмовидных и радиальной базисной функции Гаусса.

3. Результаты

После нелинейного преобразования находят линейную разделяющую гиперплоскость в этом новом пространстве признаков. В отличие от других методов модель вероятности и функции плотности вероятности не должны быть заранее известны [20].

Во время стадии изучения методом опорных векторов используют данные обучения для поиска параметров $w = [w_1 \ w_1 \dots \ w_n]^T$ и b функции решения $d(x, w, b)$ представляется:

$$d(x, w, b) = w^T x + b = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b. \quad (1)$$

Разделяющая гиперплоскость описывается уравнением $d(x, w, b) = 0$. На этапе тестирования невидимый вектор x создаст выход y в соответствии со следующей индикаторной функцией:

$$y = \text{sign}(d(x, w, b)). \quad (2)$$

Иными словами, если $d(x, w, b) > 0$, то x принадлежит классу 1, и если $d(x, w, b) < 0$, то x принадлежит классу 2.

Весовой вектор и смещение получаются путём минимизации следующего уравнения:

$$L_d(\alpha) = 0,5\alpha^T H_\alpha - f^T \alpha \quad (3)$$

при условиях:

$$y^T \alpha = 0;$$

$$\alpha \geq 0;$$

где $H = y_i y_j (x_i x_j)$ — матрица Гессе; f — единичный вектор $f = [1, 1 \dots 1]^T$.

При наличии значения α_{0i} решение задачи двойственной оптимизации будет достаточно для определения весового вектора и смещения с использованием следующих уравнений:

$$w = \sum_{i=1}^l \alpha_{0i} y_i x_i \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{y_i} - x_i^T w \right), \quad (5)$$

где N — количество опорных векторов.

Представленный выше линейный классификатор имеет ограничения, поскольку он применим только с линейно зависимыми данными, тогда как на практике часто данные случайны и зависимость у них нелинейная. Нелинейные данные должны быть отображены на новом функциональном пространстве более высокой размерности с использованием подходящей отображающей функции $\Phi(x)$, значительно большей размерности, потенциально бесконечной. Упрощает задачу то, что во всех уравнениях функция представлена только в виде скалярного произведения.

Согласно теории Гильбертова пространства с воспроизводящим ядром [2], которая выходит за рамки настоящей статьи, функция ядра определяется как

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i)^T \Phi(x_j). \quad (6)$$

Уравнение (3) имеет следующий вид в пространстве признаков:

$$L_d(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l y_i y_j \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \quad (7)$$

при условии

$$\alpha \geq 0;$$

$$\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0.$$

Гиперповерхность в уравнении (1) задаётся в виде нелинейного пространства следующим уравнением:

$$d(x) = \sum_{i=1}^l y_i \alpha_i K(x_i, x). \quad (8)$$

Решение уравнения (7) даёт классификатор с жёсткими границами. В общем, полезно использовать классификатор мягких полей, чтобы сохранить гладкость гиперплоскости и предотвратить стремление α_i к бесконечности. Данный классификатор получается с использованием того же процесса минимизации, просто путём добавления ещё одного ограничения к уравнению (7). Ограничение $0 \leq \alpha_i \leq C$, где C определяется пользователем.

Если C стремится к бесконечности, классификатор мягких границ стремится к жёстким границам [1], [5], [7], [18—22].

3.1. Техническая составляющая системы

Системы обнаружения лесного пожара можно реализовать с помощью специализированных камер, способных фиксировать изображение в различных диапазонах спектра шкалы электромагнитных излучений. Самая сложная задача в этом случае — определение места установки видеокамер для лучшего обзора наблюдаемой территории. Поскольку у данных систем есть определённые ограничения из-за статичного положения видеокамер, то в последние годы широкое применение находит использование БПЛА. В предлагаемой системе раннего обнаружения признаков лесных пожаров предусмотрено использование специализированных видеокамер и/или тепловизоров. Кроме этого, БПЛА имеют постоянную двухстороннюю связь с базовой станцией (рисунок 1).



Рисунок 1. Состав системы раннего обнаружения лесных пожаров

Figure 1. Composition of the forest fire early detection system

Многие десятилетия БПЛА широко использовались в различных областях (Вооружённых силах, сельском хозяйстве и многих других). В предлагаемой системе раннего обнаружения лесных пожаров предлагается использовать БПЛА двух типов — с неподвижным крылом и мультироторные. БПЛА с неподвижным крылом отличаются рядом преимуществ от дронов других классов, таких как повышенная крейсерская скорость и надёжность, достижение большей высоты полёта и больший обзор наблюдаемой территории. В то же время мультироторные БПЛА способны взлетать и приземляться вертикально при любом типе ландшафта и более экономичны. В настоящее время развиваются также гибридные БПЛА, которые объединяют преимущества обоих [1], [3], [20].

Как видно из блок-схемы, представленной на рисунке 2, система выявляет пожар в три этапа.

Первый этап (выделен синим цветом) осуществляет БПЛА с неподвижным крылом, который для более широкого обзора пролетает на высоте от 350 до 5000 м. При обнаружении подозрения на лесной пожар к выполнению второго этапа приступает получивший сигнал тревоги и координаты района от БПЛА с неподвижным крылом БПЛА мультироторного типа (выделено зелёным цветом), который осматривает подозрительный район с более низкой высоты для подтверждения наличия лесного пожара. Если наличие пожара не подтверждается, то мультироторный БПЛА возвращается на базу. В противном же случае мультироторный БПЛА передаёт сигнал тревоги наземной противопожарной службе (выделено оранжевым цветом), которой продолжает помогать контролировать выявленную область. Таким образом, второй БПЛА позволяет сократить количество ложных определений лесных пожаров, поскольку мультироторные дроны способны летать на более низкой высоте (до 350 м) по сравнению с дронами с неподвижным крылом, что обеспечивает наилучший обзор.

Также оба БПЛА снабжаются специализированными многоспектральными камерами, которые позволяют выполнять полный анализ района, где подозревается пожар. Изображения, захваченные многоспектральными камерами, могут обрабатываться и использоваться для создания нормализованного относительного индекса растительности (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) карты ландшафта. NDVI — простой графический индикатор, который может использоваться для оценки ущерба от пожара [6], [9], [20].



Рисунок 2. Блок-схема операционного принципа ранней платформы обнаружения лесных пожаров

Figure 2. Flowchart of the operational principle of the early forest fire detection platform

Система взаимодействия БПЛА полностью автоматизирована. Для совершенствования указанной системы предлагается задействовать искусственный интеллект, позволяющий БПЛА прогнозировать лесные пожары с использованием нейронных сетей. В настоящее время нейронные сети является достаточно востребованным видом в вычислительных системах из-за

их способности «обучаться» выполнить задачи на основе примеров. Нейронные сети вдохновлены биологическими нейронными связями в человеческом мозге.

После проведения анализа рынка БПЛА было решено использовать модель «ГАММА» с неподвижным крылом (рисунок 3), российский многоцелевой беспилотный летательный аппарат, спроектированный компанией «Автономные аэрокосмические системы — Геосервис». Максимальная скорость данного БПЛА составляет 140 км/ч, эффективная дальность полёта составляет 50 км, а максимальная продолжительность нахождения в воздухе — 12 ч, что, в свою очередь, вполне удовлетворяет нашим целям и задачам. Из-за большой высоты полёта БПЛА с неподвижным крылом значительным становится и расстояние камер до земной поверхности, что может при попытках определить наличие лесного пожара приводить к большому количеству ложных тревог. Второй, но уже мультироторный БПЛА необходим для тщательного изучения подозрительного района и сведения к минимуму ложных тревог. Мультироторный БПЛА снабжается более качественной видеокамерой и летит на более низкой высоте для достижения лучшей видимости. Выбор остановили на влагозащищённом БПЛА DJI Matrice 210 (рисунок 4), способном летать в дождь или туман.

3.2. Реализация системы искусственного интеллекта

Искусственный интеллект стал чрезвычайно популярен в последние годы, поскольку он способен выполнять задачи, присущие человеческому разуму. Искусственный интеллект (машинный интеллект) реализуется с помощью нейронных сетей.



Рисунок 3. БПЛА «ГАММА»

Figure 3. UAV «GAMMA»



Рисунок 4. DJI Matrice 210

Figure 4. DJI Matrice 210

Нейронные сети — это специализированные компьютерные модели, которые можно обучить выполнению различных задач. Они используются для классификации изображений, распознавания речи, перевода текстов и более сложных задач, таких как управление автономными транспортными средствами и т. д. Существует несколько типов нейронных сетей,

но наиболее широко используемыми для обнаружения изображений и компьютерного видения являются свёрточные нейронные сети [2], [4], [20]. Они состоят из входного слоя, скрытых слоёв и выходного слоя взаимосвязанных нейронов. В зависимости от количества скрытых слоёв применяются методы машинного обучения (только с одним скрытым слоем) и методы глубокого обучения (с более чем одним скрытым слоем). Например, на рисунке 5 представлена глубокая нейронная сеть, поскольку она имеет два скрытых слоя.

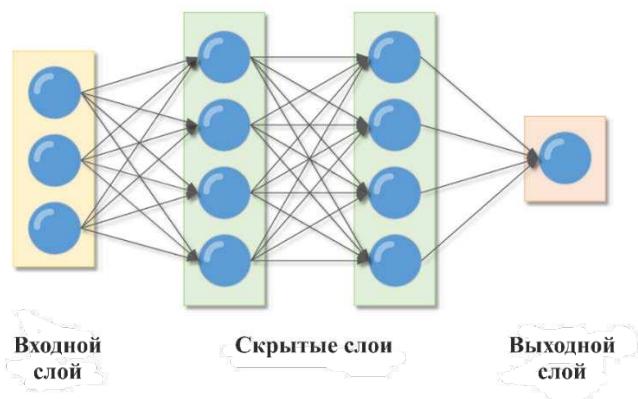


Рисунок 5. Пример нейронной сети глубокого обучения с двумя скрытыми слоями

Figure 5. An example of a deep learning neural network with two hidden layers

Входные нейроны представляют собой данные, используемые для обучения. Например, если входной сигнал (вход) представляет собой изображение, входные нейроны могут представлять значения для каждого пикселя. Нейроны, скрытые в средних слоях, обычно служат для математических вычислений. Связи между нейронами уравновешиваются, определяя значимость входного значения.

Принцип обнаружения изображения показан на рисунке 6. Этот пример показывает, как нейронная сеть может распознавать цифру на заданном изображении с разрешением восемь на восемь пикселей (столь низкое разрешение приводим для простоты примера). Все пиксели изображения передаются в качестве входных нейронов модели. Уникальность активированного нейрона определяет результат. Перед выполнением таких сложных задач каждую нейронную сеть необходимо обучить. Обучение можно описать как процесс нахождения связей между нейронами, при которых минимизируется функция потерь. Обучение может быть контролируемым и неконтролируемым.

Системы машинного обучения узнают, как комбинировать входные данные для получения полезных прогнозов на основе ранее не публиковавшихся данных. В случае машинного обучения строятся модели, исследуется множество примеров и реализуется попытка найти

модель, минимизирующую потери. Потеря определяется как разница между фактическим значением и прогнозируемым выходом. Функция потерь минимизируется за счёт изменения значений весов связей между нейронами. Обучение с учителем можно использовать как для структурированных, так и для неструктурированных данных. Простые алгоритмы машинного обучения хорошо работают со структурированными данными, но когда дело доходит до неструктурированных данных, их производительность, как правило, низкая. Именно здесь нейронные сети оказались настолько эффективными и полезными. Они исключительно хорошо работают с неструктурированными данными. Структурированные данные — это чётко определённые входные данные, которые имеют значимые значения, в то время как неструктурированные данные относятся к таким вещам, как аудио и изображения, где цель состоит в том, чтобы распознать, что находится на изображении или что такое текст (например, обнаружение объекта). Здесь функциями могут быть значения пикселей в изображении, и неясно, что каждый пиксель изображения представлен в изображении, и поэтому это подпадает под неструктурированные данные [5], [7], [10—12], [20].

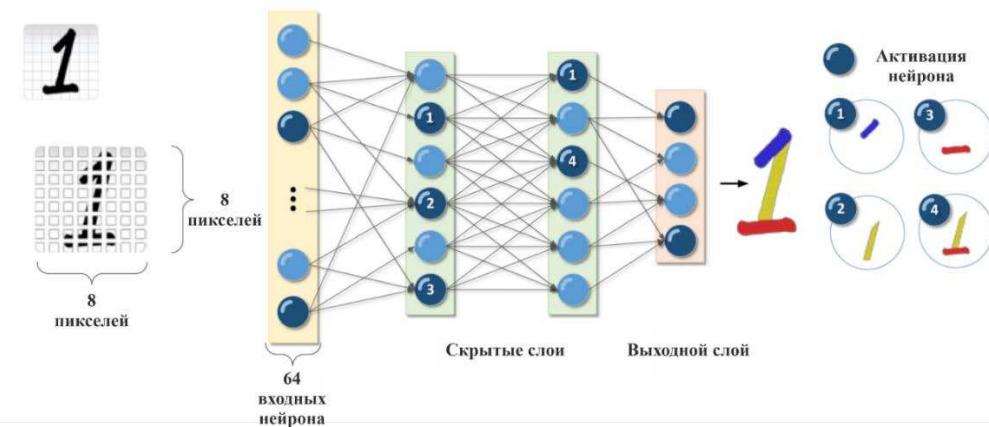


Рисунок 6. Принцип обнаружения изображения моделью нейронной сети

Figure 6. The principle of image detection by a neural network model

Таким образом, система раннего обнаружения лесных пожаров может быть отнесена к категории задач бинарной классификации. Модели классификации изображений относят изображения к одной категории, обычно соответствующей наиболее заметному объекту. В лесу самым заметным объектом может быть дерево, река, куст или даже сам лес. По этой причине классификация изображений как частного решения не может быть эффективной. Присвоение метки моделям классификации изображений может стать сложным и неопределенным. Таким образом, модели обнаружения объектов больше подходят для идентификации нескольких соответствующих объектов на одном изображении или, в нашем случае, только одного дыма.

Есть ещё одно преимущество обнаружения объектов — возможность локализовать объект на изображении. Сравнение между классификацией изображений, обнаружением объектов и сегментацией экземпляров представлено на рисунке 7.



Классификация



Классификация с локализацией



Выделение объектов



Пример детализации

Рисунок 7. Сравнение классификации изображений, обнаружения объектов и их детализации

Figure 7. Comparison of images classifications, objects detection and objects specification

3.3. Построение нейронной сети компьютерного видения для обнаружения дыма на изображениях

Для улучшения системы и реализации функции обнаружения дыма на статичных изображениях сначала необходимо обучить нейронную сеть его распознавать, что можно осуществить несколькими методами. Для использования алгоритма обнаружения объектов сначала нужно определить входные данные. Входные данные (набор данных) — набор изображений, на которых присутствует и отмечено задымление. Набор данных должен быть

разделён на две части — для обучения и для тестирования. Это основное требование, позволяющее избежать так называемого переобучения. Иногда после обучения нейронные сети очень хорошо работают с обучающими данными (или очень похожими изображениями) и не так хорошо с новыми изображениями. Это называется переоснащением модели [3], [20].

Некорректным подходом является использование всех данных для оценки параметров (обучения алгоритму), потому что тогда не останется данных для тестирования метода, а модель станет переобученной. Повторное использование одних и тех же данных и для обучения, и для тестирования также некорректно, поскольку для оценки модели необходимо знать, как метод будет работать на данных, которые не использовались для его обучения. Оптимальное разделение набора данных — около 75 % изображений для обучения и 25 % для тестирования [13—17], [20].

4. Обсуждение и заключение

Система раннего обнаружения лесных пожаров находится в стадии дальнейшего развития. Представленные в статье модели БПЛА в настоящее время уже сняты с производства, но их ещё возможно приобрести. В то же время на смену им приходят всё более и более совершенные модели, значительно растёт список производителей БПЛА. Также немалую роль играет то, что в Российской Федерации в настоящее время оценили значимость беспилотной техники в различных отраслях и предпринимаются меры для расширения отечественного производства.

Предлагаемый подход направлен на то, чтобы улучшить имеющиеся системы обнаружения лесных пожаров и значительно снизить ущерб, вызванный несвоевременным или запоздалым их обнаружением.

Список литературы

1. Анализ перспективных физических методов обнаружения возгораний / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, А. Ю. Когочев, А. С. Попов // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. С. 335—339.
2. Бобков А. В. Системы распознавания образов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 190 с.
3. Богуш Р. П., Тычко Д. А. Алгоритм комплексного обнаружения дыма и пламени на основе анализа данных систем видеонаблюдения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2015. № 6 (92). С. 63—71.
4. Гибсон У. Распознавание образов. СПб.: Азбука, 2015. 384 с.
5. Кириченко А. А. Основы теории искусственных нейронных сетей. Б. м., 2020. 222 с. URL: rusneb.ru. Текст: электронный.
6. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
7. Крюкова М. С., Фахми Ш. С. Сегментация полутоновых изображений лесных пожаров на основе дисперсионного анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета

Государственной противопожарной службы МЧС России: Научно-аналитический журнал. 2019. № 3. С. 103—111.

8. Лесные пожары в России. «Антирекорды» и территории распространения // Информационное агентство России «ТАСС»: [сайт]. 2022. URL: <https://tass.ru/info/15559017> (дата обращения: 05.09.2022).
9. Лукьяница А. А., Шишкин А. Г. Цифровая обработка видеоизображений. М.: Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. 518 с.
10. Методы искусственного интеллекта в программных приложениях: Лабораторный практикум. Учебное электронное издание сетевого доступа / Б. Г. Ильясов, Е. А. Макарова, Е. Ш. Закиева, Э. Р. Габдуллина. Уфа, 2021. 153 с. URL: www.ugatu.su. Текст: электронный.
11. Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии / Г. А. Кухарев, Н. Л. Щеголева, Ю. Н. Матвеев, Е. И. Каменская. М.: Политехника, 2013. 388 с.
12. Никитин А. А., Лиманова Н. И. Процесс распознавания изображения нейронной сетью // Молодой учёный. 2020. № 47 (337). С. 23—25. URL: <https://moluch.ru/archive/337/75420/> (дата обращения: 05.09.2022). Текст: электронный.
13. Астратов О. С., Смирнов В. М., Филатов В. Н. Обнаружение лесных пожаров по видеоизображениям // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 7—11.
14. Обработка изображений в прикладных телевизионных системах / О. С. Астратов [и др.]. СПб.: ГУАП, 2012. 272 с.
15. Применение алгоритмов анализа изображений для обнаружения пожаров / А. О. Кузнецов, В. М. Мусалимов, А. П. Саенко, К. В. Трамбицкий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 51—56.
16. Пятаева А. В. Сегментация областей задымления на видеопоследовательности // Сибирский аэрокосмический журнал. 2016. Т. 17, № 3. С. 625—630.
17. Система видеомониторинга для обнаружения лесного пожара в районе промышленного предприятия // О. С. Астратов, В. М. Смирнов, В. Н. Филатов, А. В. Митко // Neftegaz.RU: Деловой журнал. 2020. № 2 (98). С. 58—61. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/527122-sistema-videomonitoringa-dlya-obnaruzheniya-lesnogo-pozhara-v-rayone-promyshlennogo-predpriyatiya/> (дата обращения: 05.09.2022). Текст: электронный.
18. Васюков В. Н., Зайцева А. Ю., Бондаренко В. В. Система раннего обнаружения лесных пожаров — архитектура и алгоритмы // Доклады АН ВШ РФ. 2015. № 2 (27). С. 43—56.
19. Antoine C. Detection of forest fires using artificial intelligence. Année académique, 2021. 153 p.
20. Artificial intelligence for forest fire prediction / G. Sakr, I. Elhajj, G. Mitri, U. Wejinya // Environmental Science, Computer Science 2010 IEEE. ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2010. P. 1311—1316.
21. Att squeeze u-net: A lightweight network for forest fire detection and recognition / J. Zhang, H. Zhu, P. Wang, X. Ling // IEEE Access, 9. 2021. P. 10858—10870.
22. Early Forest Fire Detection Using Drones and Artificial Intelligence / D. Kinaneva, G. Hristov, J. Raychev, P. Zahariev // Conference: 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2019. P. 1060—1065.

References

1. Shegelman I. R., Galaktionov O. N., Kogochev A. Y., Popov A. S. Analysis of promising physical methods of fire detection. *Advances in modern natural science*, 2016, no. 12, pp. 335—339. (In Russ.)
2. Bobkov A. V. *Systems of pattern recognition*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2018. 190 p. (In Russ.)
3. Bogush R. P., Tychko D. A. Algorithm of complex detection of smoke and flame based on the analysis of data from video surveillance systems. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, 2015, no. 6 (92), pp. 63—71. (In Russ.)
4. Gibson U. *Recognition of Images*. St. Petersburg, Azbuka, 2015. 384 p. (In Russ.)
5. Kirichenko A. A. Fundamentals of the theory of artificial neural networks. S. n., 2020. 222 p. Available at: rusneb.ru. Text. Image: electronic. (In Russ.)
6. Krasilnikov N. N. *Digital processing of 2D and 3D images*. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2011. 608 p. (In Russ.)
7. Kryukova M. S., Fakhmi Sh. S. Segmentation of halftone images of forest fires on the basis of dispersion analysis. *Scientific and analytical journal «Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia»*, 2019, no. 3, pp. 103—111. (In Russ.)
8. Forest fires in Russia. «Anti-records» and territories of distribution. *Information Agency of Russia «TASS»: [site]*. 2022. Available at: <https://tass.ru/info/15559017> (accessed: 05.09.2022). (In Russ.)
9. Lukyanitsa A. A., Shishkin A. G. *Digital processing of video images*. Moscow, ISS Press, 2009. 518 p. (In Russ.)
10. Ilyasov B. G., Makarova E. A., Zakieva E. Sh., Gabdullina E. R. *Methods of artificial intelligence in software applications. Laboratory practice. Text: uchebnoe electronic edition of network access*. Ufa, 2021. 153 p. Available at: www.ugatu.su. Text. Image: electronic. (In Russ.)
11. Kukharev G. A., Shchegoleva N. L., Matveev Y. N., Kamenskaya E. I. *Methods of processing and recognition of facial images in the problems of biometrics*. Moscow, Polytechnica, 2013. 388 p. (In Russ.)
12. Nikitin A. A., Limanova N. I. The process of image recognition by the neural network. *Young Scholar*, 2020, no. 47 (337), pp. 23—25. Available at: <https://moluch.ru/archive/337/75420/> (accessed: 05.09.2022). Text. Image: electronic. (In Russ.)
13. Astratov O. S., Smirnov V. M., Filatov V. N. Detection of forest fires by video images. *SUAI Scientific Session: sb. dokl.* St. Petersburg, SUAI, 2018, pp. 7—11. (In Russ.)
14. Astratov O. S. [et al.]. *Image processing in applied television systems*. St. Petersburg, SUAI, 2012. 272 p. (In Russ.)
15. Kuznetsov A. O., Musalimov V. M., Sayenko A. P., Trambitsky K. V. Application of image analysis algorithms for fire detection. *Proceedings of higher educational institutions. Instrumentation*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 51—56. (In Russ.)
16. Pyataeva A. V. Segmentation of areas of smoke on video sequences. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 625—630. (In Russ.)
17. Astratov O. S., Smirnov V. M., Filatov V. N., Mitko A. V. Video monitoring system for forest fire detection in the area of an industrial enterprise. *Neftegaz.RU: Business Magazine*, 2020, no. 2 (98), pp. 58—61. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/527122-sistema>

videomonitoringa-dlya-obnaruzheniya-lesnogo-pozhara-v-rayone-promyshlennogo-predpriyatiya/ (accessed: 05.09.2022). Text. Image: electronic. (In Russ.)

18. Vasyukov V. N., Zaitseva A. Yu., Bondarenko V. V. The system of early detection of forest fires — architecture and algorithms. *Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*, 2015, no. 2 (27), pp. 43—56. (In Russ.)
19. Antoine C. *Detection of forest fires using artificial intelligence*. Année académique, 2021. 153 p.
20. Sakr G., Elhajj I., Mitri G., Wejinya U. Artificial intelligence for forest fire prediction. *Environmental Science, Computer Science 2010 IEEE. ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2010, pp. 1311—1316.
21. Zhang J., Zhu H., Wang P., Ling X. Att squeeze u-net: A lightweight network for forest fire detection and recognition. *IEEE Access*, 9, 2021, pp. 10858—10870.
22. Kinaneva D., Hristov G., Raychev J., Zahariev P. Early Forest Fire Detection Using Drones and Artificial Intelligence. *Conference: 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 1060—1065.

© Вычерова Н. Р., Будевич Е. А., Беляев А. Э., 2022



УДК 625.711.84: 338.556

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6583

Статья

Математическая модель определения общей стоимости ресурсов лесных земель с учётом уровня развития лесотранспортной сети

Ковалев Рудольф Николаевич

доктор технических наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), kir9624@yandex.ru.

Еналеева-Бандура Ирина Михайловна

кандидат технических наук, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), melnikov1978@inbox.ru

Баранов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Получена: 3 октября 2022 / Принята: 26 декабря 2022 / Опубликована: 27 декабря 2022

Аннотация: В современных экономических условиях, учитывая принципы устойчивого развития территорий лесного фонда, перед лесной отраслью стоит задача обеспечения многоцелевого, рационального, непрерывного, неистощимого лесопользования. Очевидно, что одним из ключевых факторов достижения устойчивого управления лесопользованием является эффективность управления стоимостью лесных благ как объектов национального богатства. Данное обстоятельство обуславливает необходимость определения величины показателя суммарной стоимости ресурсов леса. При этом транспортная сеть на территории

лесного фонда имеет решающее значение, поскольку без неё невозможен любой вид лесопользования, а следовательно, и аспект преобразования стоимости лесных ресурсов в части валовой выручки от их реализации. Соответственно, транспортная доступность лесных земель является основным фактором при определении оценки ресурсного потенциала территорий лесного фонда. Таким образом, в условиях соблюдения принципов устойчивого развития лесных территорий одной из ключевых задач является разработка моделей определения величины суммарной стоимости лесных благ на основе комплексного подхода в условиях многоцелевого лесопользования с учётом уровня развития лесотранспортной сети. В этой связи в данной статье произведён анализ основных методологических подходов к общей экономической оценке ресурсов леса. Посредством произведённого анализа выявлено, что существующие методики оценки общей стоимости лесных благ, в основном, ориентированы на аспект рубок спелых и перестойных насаждений. Прочие виды лесопользования и так называемые «невесомые полезности лесов» либо не учитываются, как и уровень развития транспортной сети, либо методы их учёта недостаточно проработаны. Данное обстоятельство является причиной возможности недооценивания ресурсного потенциала лесных территорий, что, в свою очередь, может привести к утрате лесоучастков, ценных как экономически, так и экологически. В этой связи актуальным научным направлением становится разработка комплексной модели расчёта общей экономической стоимости лесных благ в динамической постановке с учётом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда на базе эколого-экономического критерия. В основе представленного в статье методологического аппарата лежит инструментарий экономико-математического моделирования в контексте комбинаторного подхода с учётом динамики входных параметров. Модель представлена с помощью подробного описания всех входящих в неё зависимостей, отмечены преимущества её применения.

Ключевые слова: земли лесного фонда, транспортная сеть, эколого-экономический критерий, продуктивность лесных земель

DOI: DOI: 10.15393/j2.art.2022.6583

Article

Mathematical model for determining the total cost of forest land resources taking into account the level of development of the forest transport network

Rudol'f Kovalev

D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), kir9624@yandex.ru

Irina Enaleeva-Bandura

Ph. D. in engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Russian Federation), melnikov1978@inbox.ru

Aleksandr Baranov

Ph. D. in engineering, associate professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Russian Federation), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Received: 3 October 2022 / Accepted: 26 December 2022 / Published: 27 December 2022

Abstract: In modern economic conditions the principles of sustainable development of forest fund territories impose the industry to ensure multi-purpose, rational, continuous, inexhaustible forest management. It is obvious that one of the key factors in achieving sustainable forest management is the efficiency of managing the value of forest benefits as objects of national wealth. This circumstance makes it necessary to determine the value of a forest resources total cost indicator. The transport network on the territory of the forest fund is of decisive importance as it provides both forest use and converts the value of forest resources into a part of the gross proceeds from their sale. Consequently, the transport accessibility of forest lands is the main factor in assessment of the resource potential of the forest fund territories. Thus, one of the key tasks is to develop models to determine the value of the total value of forest benefits basing on an integrated approach

in the context of multipurpose forest management and taking into account the level of the forest transport network development. This article analyzes the main methodological approaches to the general economic assessment of forest resources. The analysis revealed that the existing methods for assessing the total value of forest benefits are mainly focused on the use of mature and overmature forests. Other types of forest use and the so-called "insignificant benefits of forests" are either not taken into account, as well as the level of development of the transport network, or the methods of their accounting are not sufficiently developed. Therefore the resource potential of forest areas might be underestimated, which in turn may lead to the loss of forest areas that are valuable both economically and ecologically. In this regard, the development of a complex model for calculating the total economic value of forest benefits in a dynamic setting, which takes into account the level of development of the transport network on the territory of the forest fund and is based on the ecological and economic criterion, is becoming an urgent scientific direction. The methodological apparatus presented in the article is based on economic and mathematical modeling in the context of the combinatorial approach taking into account the dynamics of input parameters. The model is presented with a detailed description of all dependencies included; the advantages of its use are noted.

Keywords: total forest land, transport network, ecological and economic criteria, productivity of forest lands

1. Введение

Проблемы определения суммарной экономической стоимости лесных благ в Российской Федерации можно считать наиболее обсуждаемыми и находящимися в центре внимания государства и общества. Данное определение служит основой решения следующих задач: более полного и рационального использования лесных ресурсов, включая ресурсы, определённые в научной литературе [9] как «невесомые полезности леса»; повышения эффективности лесохозяйственных мероприятий по восстановлению, охране и защите лесов. Кроме того, на базе показателя общей экономической стоимости ресурсного потенциала территорий лесного фонда может быть выработана единая методика кадастровой оценки лесных земель. Таким образом, определение главных элементов, формирующих показатель суммарной экономической стоимости лесных благ, представляет возможность решения множественных задач социальной, экономической и политической сфер существования современного общества.

Учитывая вышеизложенное, становится очевидным, что разработка эффективного методологического аппарата определения отмеченного показателя является актуальным научным направлением.

Следует отметить, что осуществлять определение показателя суммарной экономической стоимости ресурсного потенциала территорий лесного фонда невозможно без учёта уровня развития лесотранспортной сети, поскольку именно транспортная доступность обеспечивает все виды лесопользования.

Исходя из сказанного выше, можно утверждать, что разработка обозначенных оптимизационных моделей невозможна без учёта фактора планирования сети лесных дорог. Тем не менее до настоящего времени в научных трудах по обозначенной проблематике отсутствуют модели определения показателя суммарной экономической стоимости ресурсного потенциала лесных земель, учитывающие влияние данного фактора.

2. Материалы и методы

Суммарную стоимость лесных благ можно рассматривать как денежное выражение комплексной продуктивности лесных территорий, т. е. как оценку экологического и экономического потенциала участка лесного фонда и его социального значения. Показатель данной стоимости представляет собой интегральную сумму прямого и косвенного лесопользования, стоимости существования лесов и отложенной альтернативы их использования (рисунок 1). Отмеченный показатель предназначается для оценки деятельности хозяйствующих субъектов лесной отрасли, как представителей органов управления, так и лесопользователей. Указанный показатель даёт возможность рассчитать сумму оплаты за перевод земель лесного фонда в нелесные, а также размер платежей за использование лесных земель.

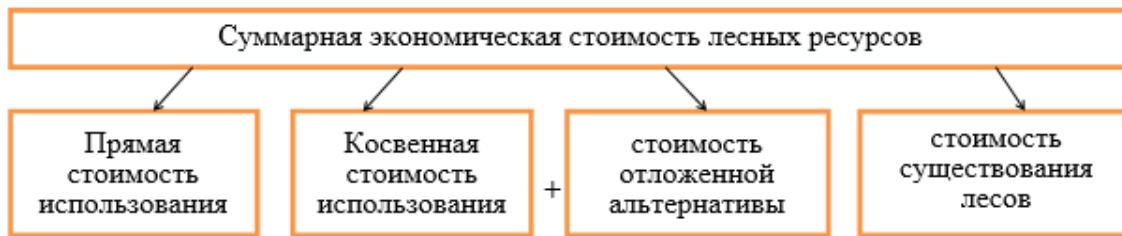


Рисунок 1. Традиционный подход к формированию показателей суммарной экономической стоимости лесных благ

Figure 1. Traditional approach to the formation of indicators of the total economic value of forest benefits

Анализируя материал, представленный на рисунке 1, несложно прийти к выводу, что прямую стоимость лесопользования рассчитать довольно легко, чего нельзя сказать об остальных составляющих суммарной экономической стоимости. Как, например, расчёт в рамках косвенной стоимости использования показателя увеличения производительности труда посредством рекреации. Также сложность расчёта общей экономической стоимости характеризуется не только трудностью определения величины косвенной стоимости лесных ресурсов, но и проблематичностью отнесения их к той либо другой категории слагаемых обозначенного показателя. Например, стоимость существования также можно рассматривать с различных позиций, в зависимости от категории лесов (экологическая недоступность для главного лесопользования), в зависимости от целей сохранения лесов (если территория используется в рекреационных целях, то логично стоимость существования рассчитывать в разрезе прямой стоимости использования, и т. д.). Или, допустим, рассмотрение показателя «объём запаса древесного ресурса» носит двойственный характер — с одной стороны, данный показатель представляет собой не реализованный запас древесины какой-либо породы, с другой стороны, рассматривается как объём ресурса, продуцирующего углерод-депонирующую функцию лесов при различных стоимостных показателях по вариантам рассмотрения и т. п.

Исходя из анализа научной литературы [1—14] можно выделить три основных методологических подхода к формированию суммарной экономической оценки ресурсного потенциала лесных территорий (рисунок 2).

Методы экономической оценки, основанные на рентном подходе, получили более широкое распространение, т. к. они учитывают реальный экономический эффект от использования ресурсов леса. Расчёты экономической стоимости ресурсного потенциала лесных территорий, основанные на рентном подходе, базируются на отношении рентного дохода к коэффициенту капитализации.

Расчёт рентного дохода в большинстве научных исследований [1], [5], [13] тесно связан с определением экономической доступности лесных ресурсов. Подобный подход

к определению экономической стоимости лесных благ в настоящее время используется специалистами лесного хозяйства, лесной промышленности и экономистами лесной отрасли. Преимущество данного подхода заключается в органическом сочетании экономических и экологических требований. Однако он не учитывает реальных издержек на создание транспортной инфраструктуры, очерёдности освоения конкретных участков леса [2].

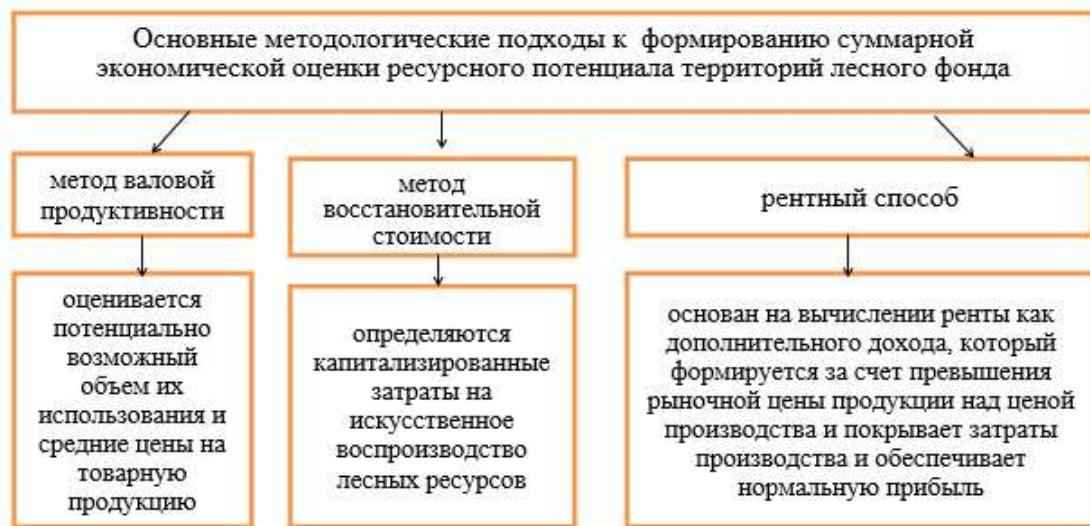


Рисунок 2. Основные методологические подходы к формированию суммарной экономической оценки ресурсного потенциала лесных территорий

Figure 2. The main methodological approaches to the formation of the total economic evaluation of the resource potential of forest territories

Недостатком данного подхода является сложность проведения расчётов итогового показателя, т. к. распределённые во времени доходы подвержены существенным изменениям. Сложность возникает также при определении ставки капитализации, поскольку её значение сопряжено с экономической нестабильностью в стране, обусловленной постоянными изменениями в финансовой и правовой системах регулирования хозяйственной деятельности.

Методология расчёта посредством определения восстановительной стоимости базируется на затратном подходе к оценке недвижимого имущества. Данная оценка основана на определении совокупных затрат, которые были произведены при создании оцениваемого недвижимого имущества. При применении данного метода в расчётах суммарной экономической стоимости лесных благ оценке подлежат как естественные лесные насаждения, так и искусственно созданные, с учётом временного интервала их выращивания, данных таксационного учёта и др.

Определение стоимости полезных функций леса при данном методе рассчитывается согласно текущим ценам на момент производства оценки, с учётом совокупных затрат

на выращивание лесов. Данный метод, по сути, является обратным предыдущему (рентный способ), при котором будущие доходы приводятся к моменту оценки. В описываемой методологии к моменту оценки необходимо приведение произведённых в прошлом затрат. Недостатком данного метода является изменение остаточной стоимости оцениваемых объектов, данное изменение обусловлено физическим и моральным износом лесных объектов. Достаточно сложным моментом в обозначенном подходе к определению суммарной экономической стоимости лесных земель является расчёт данного износа [11].

Что касается метода валовой продуктивности территории лесного фонда, то можно отметить следующее: оценка стоимости продуктивности лесных земель определяется посредством расчёта потенциально возможного объёма использования лесных благ в средних ценах на товарную продукцию. Преимуществом данного метода является комплексный подход к объекту оценивания. В качестве недостатков отмеченного подхода следует обозначить усреднённые стоимостные показатели, поскольку данное обстоятельство является фактором существенного снижения величины общей экономической стоимости оцениваемых лесных территорий.

Следует обозначить, что в основе каждого подхода к расчёту общей экономической стоимости лесных благ лежит та или иная математическая модель. В данной связи следует отметить, что в научной литературе [2—3], [8] существуют модели расчёта указанной стоимости, основанные на различных комбинациях вышеописанных методик. Например, в источнике [8] суммарную экономическую стоимость лесных благ предлагается рассчитывать с учётом аспектов многоцелевого лесопользования и динамики объекта оценивания.

В качестве существенного недостатка данного методологического аппарата можно отметить следующее: оценивание недревесных лесных ресурсов (ягод, живицы, грибов и пр.) в статьях суммарной экономической стоимости принимается как 10 % от стоимости деловой и дровяной древесины. Наше мнение по данному вопросу совпадает с мнением авторов источника [2] и заключается в том, что оценивание стоимости недревесных ресурсов лесных земель должно производиться через урожайность этих ресурсов на каждом лесоучастке в отдельности, с учётом объёмов выхода побочной лесопродукции. Кроме того, «при оценке вклада недревесных лесных ресурсов в общую экономическую стоимость необходимо учитывать прирост таксационных показателей, в частности диаметра, так как он увеличивается вместе с ростом дерева. Игнорирование данного факта приводит к занижению итоговых значений стоимости земель лесного фонда» [2].

Преимуществом приведённой в источнике [2] математической модели определения общей экономической стоимости, по нашему мнению, является наличие условия многоцелевого лесопользования. Очевидно, что экономическая доступность лесных ресурсов в данной модели определялась посредством рентабельности продаж. В этой связи возникает вопрос об определении дорожной составляющей (затрат на строительство и эксплуатацию ТСЛФ),

поскольку отсутствие дорог определяет невозможность продаж лесных ресурсов. Также отсутствует учёт экологической составляющей устойчивого управления лесами.

В работе [3] приведён иной подход к расчёту ресурсного потенциала лесных территорий и его доступности с экономической позиции. В данном научном труде экономическая доступность лесных благ определяется как суммарная мощность инвестирующих в освоение лесных земель предприятий. Недостатком данной методологии является отсутствие учёта при оценивании лесных объектов: пространственного расположения лесного фонда, качественно-количественных показателей и возможностей использования лесосырьевой базы в динамике и уровня развития ТСЛФ.

Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что анализ существующих методик оценки суммарной стоимости лесных ресурсов показал, что обозначенные методики, в основном, предназначены для расчёта стоимостной оценки лесных земель в аспекте главного лесопользования. Другие полезные функции леса учитываются локально, учёт уровня развитости ТСЛФ в контексте определения суммарной стоимости лесных благ в научной литературе отсутствует. Данное обстоятельство является основной причиной недооценивания ресурсного потенциала лесных земель, что может привести к утрате ценных, как с экологической, так и с экономической точки зрения, лесных земель. В этой связи актуальным научным направлением становится разработка комплексной модели расчёта общей экономической стоимости лесных земель в динамической постановке, с учётом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда на базе эколого-экономического критерия.

3. Результаты

Учитывая вышеизложенное, нами предлагается разделить суммарную экономическую стоимость лесных благ на две основные составляющие: стоимость использования (лесозаготовка) и стоимость сохранения лесных ресурсов (учёт побочного лесопользования, экологических и социальных функций леса) (рисунок 3).

Подобный подход к формированию показателей общей экономической стоимости можно считать комплексным, т. к. он способен обеспечить суммарную оценку всех полезностей леса за счёт расчёта стоимости лесных ресурсов по способу их использования либо неиспользования. В стоимость сохранения лесов нами предлагается включить показатели косвенной стоимости, которые поддаются расчёту, а также учитывать показатели отложенной альтернативы лесопользования и стоимости существования лесов в разрезе показателя неиспользования ресурсов лесных территорий. Поскольку инвестирующее в проект создания и развития ТСЛФ предприятие теряет доход от реализации запаса древесного сырья ввиду отсутствия лесной дорожной сети на данном этапе освоения, поэтому потерей данного дохода предприятие в некоторой степени оплачивает консервацию лесного массива в целях использования его на будущих этапах создания транспортной сети.

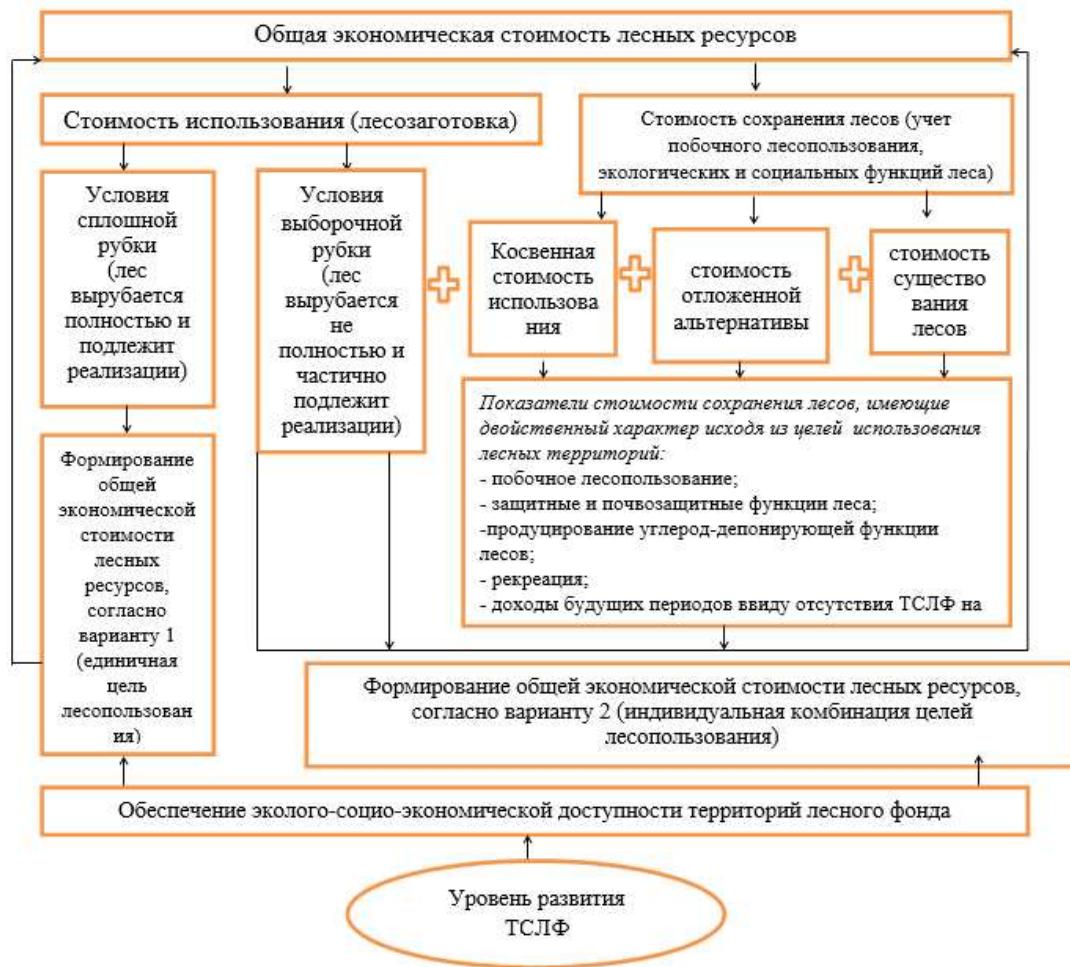


Рисунок 3. Комплексный подход к формированию показателей суммарной экономической стоимости лесных благ с учётом уровня развития ТСЛФ

Figure 3. An integrated approach to the formation of indicators of the total economic value of forest benefits, taking into account the level of development of the TNFF

Следует отметить, что в области практической деятельности хозяйствующего субъекта подлежащая к освоению территория лесного фонда может не в полном объёме использоваться в аспекте рубок спелых и перестойных насаждений (условия сплошной рубки, т. е. согласно рисунку 2, вариант 1 формирования суммарной экономической стоимости лесных благ), либо на отмеченной территории лесного фонда могут осуществляться выборочные рубки. Следовательно, часть данного лесоучастка будет сохранена и может использоваться в других целях. Исходя из того, что цели использования сохранённых лесных земель различны, то для каждого лесоучастка либо единичная цель использования, либо комбинация отмеченных целей будет носить индивидуальный характер (согласно рисунку 2, это вариант 2 формирования суммарной экономической стоимости лесных благ) [14].

Следует отметить, что данная стоимостная оценка ресурсного потенциала лесоучастков рассматривается нами с позиции лесопользователя, соответственно, общая экономическая стоимость — есть показатель вложений в целях получения прибыли от лесопользования, т. е. отмеченные вложения формируют себестоимость и должны окупаться наряду с издержками посредством реализации товарного продукта, полученного путём переработки оцениваемых ресурсов.

Учитывая вышеобозначенное, формализация вычисления величины общей экономической стоимости ресурсного потенциала лесных земель может быть задана следующими условиями:

- условие сплошной рубки. В рамках обозначенного условия лес вырубается полностью ради древесины, следовательно, в данном случае показатель стоимости неиспользования лесных ресурсов ($C^{\text{ни}}(t_i)$) равен нулю на интервал времени t_i ;
- условие выборочной рубки. При данном условии лес вырубается не полностью и пригоден для использования лесных территорий в других целях, следовательно, общая экономическая стоимость определяется как сумма стоимости использования и стоимости сохранения лесных ресурсов, согласно целям инвестирующего в проект предприятия, на интервал времени t_i - $C^{\text{и}}(t_i) + C^{\text{ни}}(t_i)$;
- условие сохранения лесного фонда. При данном условии лес не вырубается, следовательно, в данном случае показатель $C^{\text{ни}}(t_i)$ равен нулю.

Согласно отмеченным условиям, математическая модель вычисления величины общей экономической стоимости ресурсного потенциала лесных земель за весь период территории лесного фонда ($C^{\text{общ}}(T)$), с учётом дисконтирования стоимостей по периодам лесопользования, к моменту оценки имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C^{\text{общ}}(T) = \sum_{t_i=0}^T \frac{C^{\text{и}}(t_i) + C^{\text{ни}}(t_i)}{(1+\epsilon)^{t_i}} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+\epsilon)^T}\right) \rightarrow \max \\ C^{\text{общ}}(t_i) = C^{\text{и}}(t_i) + C^{\text{ни}}(t_i) \\ C^{\text{и}}(t_i) = \sum_{l=1}^L C_{il}^{\text{з}}(t_i) \times (Q_{il}^{\text{з}}(t_i) + Q_{il}^{\text{з}}(t_i - 1) \cdot K_{\text{з}}) - P'_i(t_i) \Delta t \\ C^{\text{ни}}(t_i) = C_{\text{кос}}(t_i) + C_{\text{оя}}(t_i) + C_{\text{сп}}(t_i) \\ T = \sum_{t_i=0}^T t_i \end{array} \right. \quad (1)$$

где $C_{il}^{\text{з}}(t_i)$ — стоимость древесного сырья l -й породы на i -м гектаре на корню (руб./с i -го гектара) на временнóй интервал t_i ;

$Q_{il}^{\text{з}}(t_i)$ — объём запаса древесины на корню l -й породы на временнóй интервал t_i ;

$K_{\text{з}}$ — возрастной коэффициент для перевода запаса древесины возраста ($t_i - 1$) в запас спелой древесины возраста t_i ;

$P'_i(t_i)$ — нереализация запаса l -й породы ввиду неосвоения территории лесного фонда и отсутствия ТСЛФ на временнóй интервал t_i (руб./с i -го гектара);

$C_{\text{кос}}(t_i)$ — косвенная стоимость использования (руб./с i -го гектара) на интервал времени t_i ;

$C_{\text{оя}}(t_i)$ — стоимость отложенной альтернативы (руб./с i -го гектара) на интервал времени t_i ;

$C_{\text{сп}}(t_i)$ — стоимость существования лесов (руб./с i -го гектара) на интервал времени t_i ;

t_i — период освоения территории лесного фонда (лет);

Δt — период неосвоения территории лесного фонда;

i — порядковый номер периода освоения лесных земель;

T — общий период освоения лесных земель (лет).

В косвенную стоимость использования лесных ресурсов нами предлагается включать: стоимость ягод, грибов, лекарственных трав и т. п. (т. е. d -х лесных ресурсов), стоимость продуктов от подсочки леса (приводится отдельным показателем виду различия вычисления по отношению к определению стоимостной оценки d -х лесных ресурсов).

Таким образом, косвенная стоимость использования лесных благ определяется выражением (2):

$$\begin{cases} C_{\text{кос}}(t_i) = C_g(t_i) + C_{\text{под}}(t_i) + C_{\text{поб}}(t_i) \\ C_g(t_i) = \sum_{d=1}^D C_{id}^3(t_i) \cdot Q_{id}^3(t_i) - P_i'' \cdot \Delta t(t_i) \\ C_{\text{под}}(t_i) = C^{\text{год}} \cdot K_p^{\text{об}} \\ C_{\text{поб}}(t_i) = 100 C^{\text{год}} \end{cases}, \quad (2)$$

где $Q_{id}^3(t_i)$ — объём запаса d -го лесного ресурса на момент времени t_i ;

$C_g(t_i)$ — стоимость d -х лесных ресурсов (руб./с i -го гектара) на интервал времени t_i ;

$C_{\text{под}}(t_i)$ — стоимостная оценка подсочки (руб./с i -го гектара) на момент времени t_i ;

$C_{\text{поб}}(t_i)$ — стоимостная оценка побочного лесопользования (рекреации и других целей) принимается, согласно источнику [6], равной стократной величине годового размера лесных податей, взимаемых за соответствующий вид лесопользования на оцениваемом участке лесных земель (руб./с i -го гектара), на момент времени t_i ;

$C^{\text{год}}$ — годовая ставка лесных податей, взимаемых за подсочку 1 га насаждений;

$K_p^{\text{об}}$ — коэффициент оборота рубки, изменяется от 16,39 до 4,59 при обороте рубки от 50 до 120 лет соответственно;

$C^{\text{год}}$ — годовой размер лесных податей, взимаемый за соответствующий вид лесопользования [6];

$P_i''(t_i)$ — нереализация запаса d -го лесного ресурса, невозможность подсочки и планируемых видов побочного лесопользования от неосвоения территории лесного фонда, ввиду отсутствия ТСЛФ, на интервал времени t_i (руб./с i -го гектара).

Сумма показателей ($P_i'(t_i)\Delta t + P_i''(t_i)\Delta t$) носит двойственный характер, её можно рассматривать как эффект финансовых потерь от бездорожья и как стоимость отложенной альтернативы ($C_{\text{ос}}(t_i)$) (доходы будущих периодов, ввиду отсутствия ТСЛФ, на территориях, подлежащих освоению, на момент времени t_i).

Стоимость существования лесов определяется согласно выражению (3):

$$\begin{cases} C_{\text{сл}}(t_i) = C_{\text{пф}}(t_i) + C_h(t_i) \\ C_{\text{пф}}(t_i) = (Q_{il}^3(t_i) \cdot K_l^{\text{пог}}(t_i)) \cdot C^{\text{в}} \end{cases}, \quad (3)$$

где $C_h(t_i)$ – прибыль от не включённых в показатель $C_{\text{пп}}(t_i)$ полезных (в т. ч. средо- и почвозащитных) функций леса (руб./га) на момент времени t_i ;

$C_{\text{пп}}(t_i)$ — прибыль от продуцирования углерод-депонирующей функции лесов на 1 га леса (руб./га) на момент времени t_i ;

$K_l^{\text{пог}}(t_i)$ — коэффициент поглощения CO₂ лесами l -й породы i -го гектара на момент времени t_i ;

$C^{\text{в}}$ — удельная оценочная стоимость функции поглощения CO₂ на момент времени t_i (руб./га).

Следует отметить, что расчёт показателей косвенной стоимости использования лесных ресурсов и так называемых «невесомых» полезностей леса подробно рассмотрен в работе [9].

При реализации предложенной нами математической модели следует учитывать следующие ограничения:

1. Окупаемость проекта планирования ТСЛФ:

$$C^{\text{общ}}(T) > Z_3(T), \quad (4)$$

где показатель $Z_3(T)$ включает затраты на создание ТСЛФ в период времени t_i , затраты на эксплуатацию ТСЛФ в период времени t_i , стоимость дорожно-строительных материалов, полуфабрикатов, конструкций и изделий, транспортные расходы на доставку материалов и рабочих и прочие затраты, связанные со строительством и эксплуатацией транспортной сети на территории лесного фонда.

2. Финансовая устойчивость предприятия, инвестирующего в проект планирования ТСЛФ:

$$Z_3(T) \leq \Pi_{\text{max}}, \quad (5)$$

где Π_{max} — финансовые возможности предприятия (руб.).

3. Доступность лесных территорий с учётом эколого-социоэкономического аспекта их использования:

$$P'_i(t_i)\Delta t + P''_i(t_i) < C_{\text{кос}}(t_i) + C_{\text{и}} + C_{\text{сл}}(t_i). \quad (6)$$

4. Естественная неотрицательность грузопотоков:

$$Q_{il}^{\text{з}}(t_i) \geq 0, \quad Q_{id}^{\text{з}}(t_i) \geq 0, \quad l = 1, \dots, L; \quad d = 1, \dots, D; \quad t_i = 0, \dots, T. \quad (7)$$

Предлагаемая в статье и основанная на комплексном подходе к лесопользованию математическая модель в динамической постановке обеспечивает рациональный расчёт величины суммарной экономической стоимости лесных благ с учётом уровня развития ТСЛФ.

4. Обсуждение и заключение

Представленная в данной статье математическая модель в динамической постановке предназначена для определения показателя общей экономической стоимости ресурсного потенциала территории лесного фонда с учётом уровня развития лесотранспортных сетей. Обозначенная модель носит комплексный характер, обеспечивающий учёт всех материальных и нематериальных выгод от лесопользования в динамике. Подобное моделирование позволяет:

- рассчитывать отмеченную стоимость с учётом эколого-социоэкономической доступности лесных территорий;
- распределить стоимостные характеристики ресурсов лесных земель в зависимости от целей их использования;
- более объективно определить величину арендной платы за пользование лесным фондом.

Исследование выполнено в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

Список литературы

1. Филюшина Г. Н. Рента как критерий экономической доступности лесных ресурсов // Актуальные проблемы лесопромышленных производств. Петрозаводск, 2002. С. 22—25.
2. Романчиков А. Ю. Кадастровая оценка покрытых древесной растительностью лесных земель таёжной зоны Северо-Запада Российской Федерации при многоцелевом использовании их ресурсного потенциала: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 231 с.
3. Пфаненистиль И. В. Принципы определения эколого-экономической доступности ресурсов Красноярского края: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2002. 128 с.
4. Куницкая О. А., Никитина Е. И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: Сб. ст. III Междунар. научно-техн. конф. «Минские научные чтения — 2020»: В 3 т. / Белорус. гос. технол. ун-т, Представительство Федер. агентства по делам СНГ, соотечественников, проживающих за рубежом, и по международному гуманитарному сотрудничеству (Россотрудничество) в Республике Беларусь. Минск, 2021. С. 286—291.
5. Cultivation of the targeted forest plantations / O. Kunickaya, V. Tanyukevich, D. Khmeleva [et al.] // Journal of Environmental Treatment Techniques. 2020. Vol. 8, no. 4. P. 1385—1393.
6. Болотов О. В., Ельдештейн Ю. М., Болотова А. С. Основы расчёта и планирования устойчивого управления лесопользованием: [монография]. Красноярск: СибГТУ, 2005. 180 с.
7. Куницкая О. А., Новгородов Д. В., Марков О. Б. Проблемы эффективной переработки повреждённой лесным пожаром древесины // Комплексные вопросы аграрной науки и образования: Сб. науч. ст. по материалам Внутривузов. научно-практич. конф., посвящённой 65-летию высш. аграр. образования Республики Саха (Якутия)

и Всерос. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2021». Якутск, 2021. С. 285—291.

8. Ефимова Н. Б. Формирование эколого-экономического механизма устойчивого лесопользования в малолесных районах: Автореф. дис. ... канд. экон. наук. Ставрополь, 2013. 24 с.
9. Ефимова Н. Б. Эколого-экономическая оценка стоимости лесных ресурсов в Волгоградской области // Региональная экономика. Экономика и природопользование. 2012. № 5 (263). С. 37—42.
10. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia / S. S. Morkovina, O. Kunickaya, L. Dolmatova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Vol. 18, no. 2. P. 19—26.
11. Прешикин Г. А. Анализ экономических факторов формирования стоимости лесных ресурсов // Лесной журнал. 2011. № 1. С. 131—136.
12. Развитие цифрового учёта круглых лесоматериалов / О. А. Куницкая, Н. Л. Беляев, В. В. Швецова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 55—63.
13. Niskanen A., Petrov A., Filoushkina G. Economic accessibility of forest resources in Northwest Russia // Scientific paper presented in Biennial meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics and 3rd Berkeley-KVL Conference of Natural Resource Management May 21—25. 2002. Gilleleje, Denmark.
14. Васильева Е. Ф., Токмашев А. А., Давыдова А. Л. Интегральный подход к определению показателя общей экономической стоимости лесных ресурсов с учётом уровня развития транспортной сети // Эффективный ответ на современные вызовы с учётом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Материалы XIII Междунар. научно-техн. конф. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург, 2021. С. 598—599.

References

1. Filyushkina G. N. Rent as a criterion of economic availability of forest resources. *Actual problems of timber industries*. Petrozavodsk, 2002, pp. 22—25. (In Russ.)
2. Romanchikov A. Y. *Cadastral assessment of forest lands covered with woody vegetation of the taiga zone of the North-West of the Russian Federation with multipurpose use of their resource potential*. Ph. St. Petersburg, 2017. 231 p. (In Russ.)
3. Pfaffenstiel I. V. *Principles of determining the environmental and economic availability of resources of the Krasnoyarsk Territory*. Ph. Krasnoyarsk, 2002. 128 p. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A., Nikitina E. I. Ecological aspects of selective felling. *Ecological, economic and technological aspects of sustainable development of the Republic of Belarus and Russian Federation. collection of articles of the III International Scientific and Technical Conference «Minsk Scientific Readings — 2020»: in 3 volumes. Belarusian State Technological University, Branch of the Federal Agency on CIS Affairs, Compatriots Living Abroad and International Humanitarian Cooperation (Rossotrudnichestvo) in the Republic of Belarus*. Minsk, 2021, pp. 286—291. (In Russ.)
5. Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M. Cultivation of the targeted forest plantations. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 1385—1393.
6. Bolotov O. V., Yeldeshtein Yu. M., Bolotova A. S. *The bases of calculation and planning of sustainable forest management: [monograph]*. Krasnoyarsk, SibGTU, 2005. 180 p. (In Russ.)

7. Kunitskaya O. A., Novgorodov D. V., Markov O. B. Problems of effective processing of wood damaged by forest fires. *Complex issues of agrarian science and education. Collection of scientific articles on the materials of the university scientific conference dedicated to the 65th anniversary of Higher Agrarian Education of the Republic of Sakha (Yakutia) and the All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of the «Northern Forum — 2021»*. Yakutsk, 2021, pp. 285—291. (In Russ.)
8. Efimova N. B. *Formation of an ecological and economic mechanism for sustainable forest management in sparsely forested areas. Ph. D. in Economics*. Stavropol, 2013. 24 p. (In Russ.)
9. Efimova N. B. Ecological and economic assessment of the value of forest resources in the Volgograd region. *Regional Economics. Economics and Nature Management*, 2012, no. 5 (263). 2012, pp. 37—42. (In Russ.)
10. Morkovina S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V. L., Baranova T., Shadrina S., Grin'Ko O. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 19—26.
11. Preshkin G. A. Analysis of economic factors of formation of the cost of forest resources. *Lesnoy zhurnal'*, 2011, no. 1, pp. 131—136. (In Russ.)
12. Kunitskaya O. A., Belyaev N. L., Shvetsova V. V., Rudov M. E., Grigorev V. I. Development of digital accounting of roundwood. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 55—63. (In Russ.)
13. Niskanen A., Petrov A., Filoushkin G. Economic accessibility of forest resources in Northwest Russia. *Scientific paper presented in Biennial meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics and 3rd Berkeley-KVL Conference of Natural Resource Management May 21—25, 2002. Gilleleje, Denmark*.
14. Vasilyeva E. F., Tokmashev A. A., Davydova A. L. Integral approach to determining the indicator of the total economic value of forest resources, taking into account the level of development of the transport network. *Effective response to contemporary challenges with the interaction of man and nature, man and technology: socio-economic and environmental problems of forest complex: Materials XIII International Scientific and Technical Conference. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forest Technical University*. Yekaterinburg, 2021, pp. 598—599. (In Russ.)

© Ковалев Р. Н., Еналеева-Бандура И. М., Баранов А. Н., Григорьева О. И.,

Григорьев И. В., 2022