

На правах рукописи



РУДОВ Максим Евгеньевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕЛЮЕМОЙ ПАЧКИ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ
НА УПЛОТНЕНИЕ ЛЕСНОГО ПОЧВОГРУНТА**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Петрозаводск – 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном лесотехническом университете имени С. М. Кирова

- Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Григорьев Игорь Владиславович
- Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Технологии и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»
Бурмистрова Ольга Николаевна
- кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии лесопромышленных производств, ФГАОУ ВПО Северный (Арктический) федеральный университет
Дербин Василий Михайлович
- Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет леса»

Защита диссертации состоится 25 декабря 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.190.03, созданного на базе Петрозаводского государственного университета, по адресу: 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на его сайте: <http://petsu.ru>.

Автореферат разослан «28» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Р.В. Воронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Леса РФ обеспечивают экологическую безопасность страны и планеты. Современное управление лесами, уровень охраны и воспроизводства лесов должны соответствовать возросшим социальным, экологическим и экономическим требованиям.

Все больше внимания уделяется проблеме повышения эффективности процессов заготовки древесины и лесовосстановления, которая оценивается множеством показателей, среди них весомое место занимает показатель экологической эффективности. Одним из важнейших показателей оценки экологической эффективности процессов лесозаготовок является интегральный показатель – уплотнение почвогрунта лесосеки.

Трелевка является самой экологически вредной операцией на заготовке древесины. При взаимодействии волочащейся части трелюемой пачки лесоматериалов с почвогрунтом в его массиве происходят сложные процессы. В проблеме взаимодействия трелевочных систем с почвогрунтом отсутствуют исследования, позволяющие оценивать влияние маневрирования волочащейся части трелюемой трактором пачки лесоматериалов на изменение плотности почвогрунта в боковых полосах волока.

Степень разработанности темы исследования. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, включающее в себя изучение состояния проблемы, постановку цели и задач, теоретический анализ процесса уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочных волоков волочащейся частью трелюемой пачки лесоматериалов с составлением математической модели, экспериментальное исследование этого процесса, практическую реализацию работы в виде рекомендаций по минимизации экологического ущерба от воздействия трелевочных систем на почвогрунты, а также новое техническое решение, направленное на повышение эффективности исследования лесосеки при ее подготовке к проведению лесосечных работ.

Целью диссертационной работы является уменьшение экологического ущерба от воздействия трелевочных систем на почвогрунт при разработке лесосек в различных природно-производственных условиях.

Объект исследований. Лесные почвогрунты.

Предмет исследования. Процесс уплотнения лесных почвогрунтов под воздействием волочащейся части трелюемой пачки лесоматериалов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи исследования:

- Разработать математическую модель уплотнения лесного почвогрунта трелевочной системой, позволяющую оценивать уплотнение почвогрунта в зависимости от параметров трелюемой пачки и его свойств.

- Экспериментальным путем исследовать влияние волочащейся части трелюемой пачки лесоматериалов на уплотнение почвогрунта в боковых полосах волока.
- Получить данные об адекватности разработанных математических моделей.
- Разработать новое техническое решение для оперативного определения проективного покрытия корневых систем деревьев и кустарников, направленное на повышение эффективности исследования лесосеки при ее подготовке к проведению лесосечных работ.
- Разработать рекомендации для принятия организационно-технологических решений по разработке лесосек исходя из требований минимизации экологического ущерба.

Научная новизна работы. Разработанная и исследованная математическая модель воздействия волочащейся части трелюемой пачки лесоматериалов на лесные почвогрунты, с учетом их физико-механических свойств, позволяющая определять условия и показатели уплотнения, углубляет теорию взаимодействия трелевочных систем с поверхностью их движения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать остаточные деформации почвогрунта в боковых полосах трелевочных волоков, возникающие за счет воздействия волочащейся части трелюемой пачки на почвогрунт, с учетом поворотов трелевочной системы.
2. Результаты исследования позволяют организационно-технологическими мероприятиями уменьшить экологический ущерб от воздействия трелевочных систем на почвогрунты и сохранить их лесорастительные свойства.
3. Разработанное техническое решение для оперативного определения проективного покрытия корневых систем деревьев и кустарников, направленное на повышение эффективности исследования лесосеки при ее подготовке к проведению лесосечных работ позволяет повысить эффективность исследования лесосеки путем расширения номенклатуры исследуемых показателей, за счет возможности одновременного исследования площадей больших размеров, размер которых включает размер колеи предполагаемого для выполнения лесозаготовительных работ движителя лесной машины и боковых полос трасс движения. Результатом определения армирующей способности корневых систем покрытия почвогрунтов при исследовании лесосек заявленным прибором является показатель соотношения площади корней в поверхностном слое почвогрунта к общей деформируемой площади.

Методология и методы исследования. Теоретической основой исследования явились работы ведущих отечественных и зарубежных ученых по повышению экологической эффективности лесосечных работ. В работе использованы базовые методы научно-технического познания, математиче-

ского моделирования, механики контактного разрушения, измерения и обработки экспериментальных данных.

Автор в своих исследованиях опирался на фундаментальные работы видных ученых в области оптимизации технологических процессов лесосечных работ, систем машин и режимов их работы: Анисимова Г.М., Бурмистровой О.Н., Герца Э.Ф., Григорьева И.В., Дербина В.М., Иванова В.А., Коротяева Л.В., Макуева В.А., Мясищева Г.Д., Никифоровой А.И., Рябухина П.Б., Сюнева В.С., Шапиро В.Я., Шегельмана И.Р., Ширнина Ю.А., и др.

На защиту выносятся следующие положения:

- Математическая модель уплотнения лесного почвогрунта трелемой пачкой лесоматериалов, позволяющая оценивать уплотнение почвогрунта в зависимости от параметров трелемой пачки и его свойств.
- Разделение почвогрунтов на три категории прочности, в зависимости от соотношения величин влажности почвогрунта и его предела текучести.
- Теоретические и экспериментальные оценки уплотнения в поверхностном слое почвогрунта боковых полос трелевочного волока волочащейся частью трелемой пачки лесоматериалов.
- Новое техническое решение для повышения эффективности исследования лесосеки при ее подготовке к проведению лесосечных работ.
- Технологические рекомендации, повышающие экологическую эффективность работы трелевочных систем.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается применением современных методов исследования, обоснованностью принятых допущений, обоснованностью методов расчета и моделирования, а также подтверждается экспериментальными исследованиями процесса уплотнения почвогрунта от поворотов волочащейся части трелемой пачки.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: Девятой международной научно-практической Интернет-конференции «Леса России в XXI веке» (СПб, 2012 г.); МНТК «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2012 г.); МНТК молодых ученых и специалистов «Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка» (СПб, 2011 и 2013 гг.); Республиканском научно-практическом семинаре-конференции «Инновационная система и методы использования и воспроизводства лесных ресурсов на базе новых технологий интенсивного лесопользования» (Петрозаводск, 2012 г.); МНТК «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (Кострома, 2012 г.); Политехническом молодежном фестивале науки (СПб, 2012 г.); Международном научно-практическом форуме «Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона» (Хабаровск 2013 г.); МНПК «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2014); МНТК «Актуальные проблемы и перспекти-

вы развития лесопромышленного комплекса» (Кострома, 2015 г.); и ежегодных НТК СПбГЛТУ в 2011-2015 гг.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», которая включена в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ СПб. Часть материалов работы получена при выполнении НИР № 01201255482 «Разработка теоретических основ сквозных технологических процессов и модульных систем машин лесозаготовительного производства». Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке КНВШ Правительства Санкт-Петербурга в виде премии победителям конкурса грантов 2014 г. для аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 24 работы. 5 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на полезную модель. Результаты исследований отражены в отчетах по НИР.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Общий объем работы 157 страниц. Диссертационная работа содержит 40 рисунков, 22 таблицы. Список литературы содержит 146 источников, из них 32 – на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

1. Состояние проблемы и задачи и исследования. В разделе рассмотрены технологические процессы лесосечных работ, трелевка и трелевочные системы, лесные почвы и грунты. Показано воздействие трелевочных систем на почвогрунты лесосек - уплотнение и колееобразование. Проанализированы результаты работ отечественных и зарубежных исследователей.

Анализ НИР показал, что до настоящего времени не разработаны методики и модели, позволяющие оценивать влияние маневрирования волочащейся части трелеваемой трактором пачки лесоматериалов на изменение плотности почвогрунта в боковых полосах волока. Вместе с тем, такое уплотнение необходимо учитывать при принятии решений по схеме разработки лесосеки исходя из требований минимизации экологического ущерба.

2. Математическая модель уплотнения почвогрунта в процессе трелевки пачки хлыстов. При анализе процессов трелевки древесины одной из основных задач является установление особенностей деформации и уплотнения почвогрунта при воздействии на него отдельных элементов трелевочной системы – движителя, кроны деревьев, комлей и вершин хлыстов.

В процессе трелевки точно выдержать заданное направление движения невозможно, и трелевочная система совершает поворотные движения. Это

приводит к возникновению дополнительных касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки движителя, которые оказывают разрушающее действие на почву и отрицательно влияют на ее плодородие.

Наряду с оценками поворотного воздействия представляют интерес исследования воздействия на почвогрунт веса пачки, в частности ее комлевой части, поскольку в этом случае возникает дополнительное уплотнение.

Рассмотрим схему (рисунок 1) давления на почвогрунт сосредоточенной силы $Q=P+G$, где Q – сила тяжести хлыста, $P=0,3Q$ – вес хлыста, действующий на трактор, $G=0,7Q$ – вес хлыста, действующий на почвогрунт при трелевке его за вершину, в результате чего часть хлыста может погружаться в почвогрунт на определенную величину первичной зоны осадки h_0 .

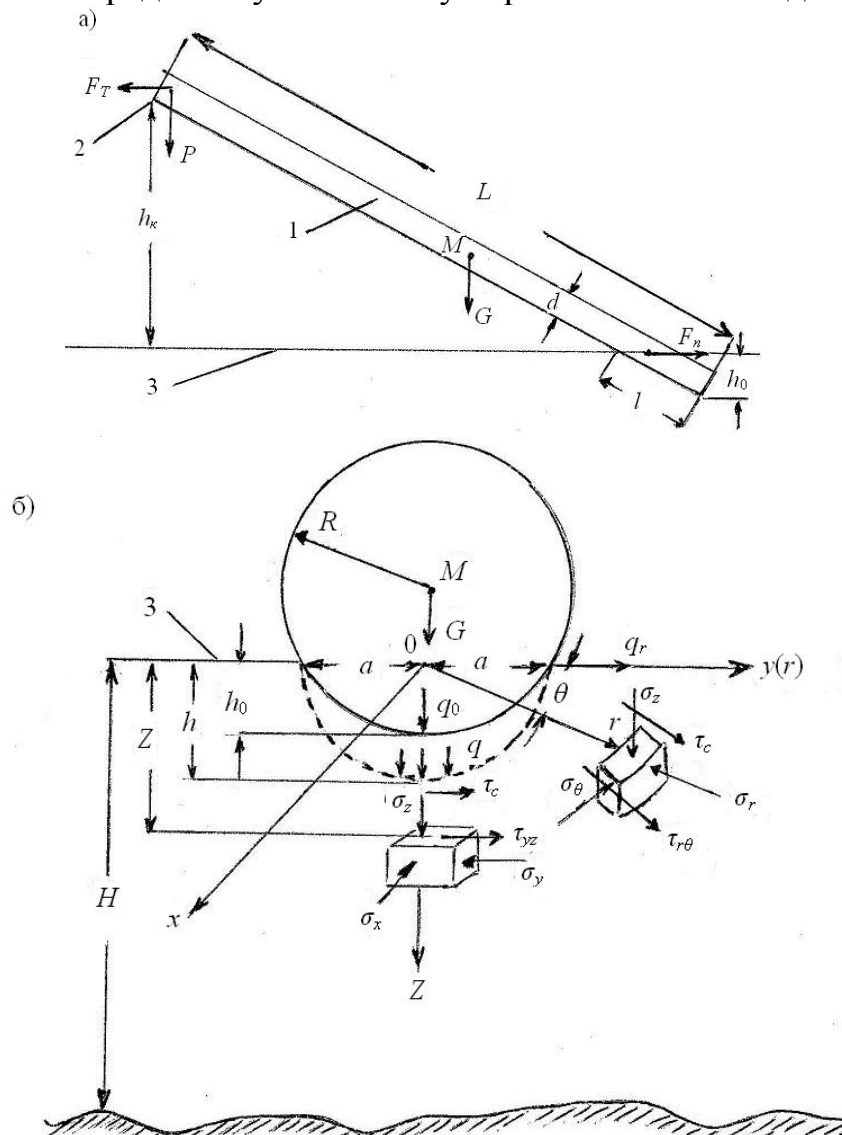


Рисунок 1. Схема расчета напряжений при воздействии комля хлыста на почвогрунт: a - схема погружения комлевой части хлыста; b - схема расчета напряжений; M – центр тяжести хлыста, h_k – расстояние от точки 2 опоры хлыста на конике до опорной поверхности 3, L – длина хлыста, l – длина хлыста в зоне касания и погружения на глубину h_0

Величина h_0 с учетом связи условного радиуса комля, получаемого по таксационному значению диаметра ствола d , определяется в виде:

$$h_0 = \left(3^n \beta \frac{\pi h_k G}{AL\sqrt{d}} \right)^{\frac{1}{n+1,5}}, \quad (1)$$

где коэффициент $\beta \geq 1$ - отношение величины L к максимально возможной подвешенной части длины хлыста; A и n - параметры грунта и штампа весом G с пятном контакта d в степенных зависимостях $q=Ah^n$, т.е. зависимостях величины давления штампа q от глубины его погружения h в пределах от 0 до глубины H зоны распространения деформаций.

На рисунке 1 б представлена схема расчета напряжений, возникающих в грунте под действием силы G в пределах зоны деформаций H , в процессе контакта и погружения комлевой части хлыста с учетом его возможного поворота на определенный угол θ .

Действующая на почвогрунт часть хлыста объемом в коре V_x определяется в соответствии со значениями L и d по сортиментным таблицам и в расчетах представлена как эквивалентная по объему и весу сфера радиусом

$$R = \sqrt[3]{\frac{0,7V_x}{\pi}}$$

с центром в точке M . Такое представление позволяет использовать математическую модель деформирования среды на основе принципов механики контактного разрушения при воздействии сферического индентора радиусом R на упругое полупространство.

В рамках этой модели основными характеристиками процесса погружения индентора в среду являются величины контактного сближения h_0 и радиуса контактной площадки $a = \sqrt{h_0 R}$, на которой действует усредненное по площади начальное равномерное давление $q_0 = \frac{G}{\pi a^2} = \frac{G}{\pi h_0 R}$.

Оценим начальные параметры контакта при следующих исходных данных нагружения почвогрунта. Трелевка одиночного хлыста осуществляется при следующих исходных данных: $L=30,5$ м; $d=0,24$ м; $V_x=0,65$ м³; $h_k=1,8$ м; $l=1,525$ м, $\beta=1,05$.

Волок проложен на влажном почвогрунте с величиной влажности W , приблизительно равной величине предела текучести W_T . Начальная плотность естественного сложения почвогрунта принимается $\rho_0=800-900$ кг/м³; модуль Юнга $E=1$ МПа; величина внутреннего сцепления $C=12$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi=15^\circ$; несущая способность $q_s=60$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu=0,25$; $H=0,4$ м. Для таких условий нагружения установлены значения коэффициентов $A=0,0564$ м.е. и $n=1,0206$, входящих в формулу (1), используя которую получены следующие параметры контакта:

$$h_0=0,047 \text{ м}; \quad a=0,157 \text{ м}; \quad R=0,53 \text{ м}; \quad q_0=61,64 \text{ кПа}. \quad (2)$$

Процесс деформирования почвогрунта за пределами зоны контакта глубиной h_0 и радиуса a рассмотрим в декартовой системе координат. На элементарных площадках массива действуют напряжения (рисунок 1 б), определяемые соотношениями:

$$\text{а) вертикальное напряжение: } \sigma_z = -q_0 \psi_z(r, z) = \left(-q_0 \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}, \quad (3 \text{ а})$$

$$\text{б) горизонтальное напряжение: } \sigma_y = q_0 \psi_y(r, z), \quad (3 \text{ б})$$

$$\psi_y(r, z) = \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2 + z^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} +$$

где

$$+ \frac{z}{\sqrt{u}} \left[\frac{(1-\nu)u}{a^2 + u} + (1+\nu) \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right],$$

$$\text{в) тангенциальное напряжение: } \tau_{yz} = -q_0 \psi_{yz}(r, z) = -q_0 \frac{a \sqrt{u} z^2 (r^2 + z^2)}{(u + a^2)(u^2 + a^2 z^2)}, \quad (3 \text{ в})$$

где $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ – координатные функции, u – положительный корень квадратного уравнения $\frac{r^2}{a^2 + u} + \frac{z^2}{u} = 1$.

Компонента σ_x может быть определена через механизм бокового расширения грунта в виде $\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z$.

Поскольку задача рассматривается в осесимметричной постановке, ось y может быть заменена на ось r , где r – радиальное расстояние от центра контакта до расчетной точки, т.е. принимаем $\sigma_y = \sigma_r$.

Как следует из анализа соотношений (3), напряженное состояние почвогрунта зависит от координат расчетной точки и радиуса контактной площадки a , которая, в свою очередь зависит, от h_0 и R .

Анализ зависимостей изменения безразмерных функций $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ от относительной величины $\bar{h} = z/h_0$ непосредственно под сферическим индентором ($r=0$) позволил сделать ряд выводов. Во-первых, отрицательные (сжимающие) вертикальные σ_z и преимущественно положительные (растягивающие) радиальные напряжения σ_r свидетельствуют о том, что разрушение массива почвогрунта происходит через механизм сдвига. Во-вторых, тангенциальные напряжения τ_{yz} по величине близки к нулю и слабо изменяются с глубиной по мере роста координаты z . Это означает, что компоненты σ_z , σ_y , и σ_x можно принять за главные – соответственно σ_1 , σ_2 и σ_3 .

Поскольку на почвогрунт кроме вертикальной силы G действует касательная (горизонтальная) сила F_T тяги трактора, необходимая для перемещения трелевочной системы, то возникает сила F_n сопротивления скольжению хлыста, в результате происходит деформация почвогрунта в направлении действия этой силы (рисунок 1 а). Следствием этого является формиро-

вание горизонтальных напряжений τ_c , перпендикулярных действию вертикальных напряжений σ_z , и обуславливающих реализацию разрушения массива грунта через механизм сдвига (рисунк 1 б).

Горизонтальные напряжения τ_c связаны с вертикальными σ_z обобщенным законом Кулона:

$$\tau_c = \sigma_z \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (4)$$

В момент отклонения трактора и, затем, хлыста от заданного направления движения на угол θ , деформирование почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$.

Компоненты тензора напряжений в этой системе, в общем случае, при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, совпадающих по направлению с действием горизонтальных напряжений τ_c , определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_1; & \sigma_r &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; & \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Из соотношений (5) следует, что при $\theta=0$ компоненты тензора напряжений являются главными, т.е. имеем: $\sigma_z=\sigma_1$, $\sigma_r=\sigma_2$, $\sigma_\theta=\sigma_3$, $\tau_{r\theta}=0$.

Результирующая величина $\tau=\tau_c+\tau_{r\theta}$ будет характеризовать суммарные сдвиговые напряжения и в качестве критерия разрушения можно принять условие превышение величиной τ предела несущей способности почвогрунта q_s , т.е.:

$$\tau \geq q_s. \quad (6)$$

Величину z , при которой выполняется условие (6), можно рассматривать в качестве предельной величины контактного сближения или максимально возможной глубины зоны осадки хлыста h_s .

Определив с помощью (3) компоненты тензора напряжений, на основании соотношений (4) и (5) были вычислены суммарные сдвиговые напряжения τ , кПа в зависимости от относительной координаты \bar{h} для различных значений угла поворота θ в пределах от 0 до 25° .

Расчет показал, что при трелевке одиночного хлыста по данному почвогрунту без каких-либо маневров трелевочной системы критерий разрушения сдвигом (6) за пределами контактной площадки ($\bar{h}=1$) не выполняется, т.е. за пределами первичной зоны осадки ($z=h_0=0,047$ м) разрушения почвогрунта сдвигом не происходит.

В том случае, если наблюдаются повороты хлыста ($\theta=10-25^\circ$), создаются условия для формирования дополнительной зона осадки, глубина которой h_s увеличивается с 0,058 до 0,082 м ($\bar{h}=1,25-1,75$). Величина радиуса контактной площадки a возрастает в этом случае с 0,176 до 0,208 м. Указанным значениям h_s в силу принятого закона изменения $q(h)$ и полученных коэффициентов A и n соответствуют величины нагрузки q на почвогрунт от сферического индентора радиусом R в диапазоне от $q=27,3$ до $q=48,33$ кПа.

Обработка графического представления результатов расчета методами корреляционно-регрессионного анализа позволила с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 > 0,93$) определить для трелевки одиночного хлыста зависимость τ от \bar{h} с учетом углового параметра θ :

$$\tau = \lambda \bar{h}^{-\eta}, \quad (7)$$

где коэффициенты λ и η являются функциями угла θ :

$$\lambda = 0,7605\theta + 23,913; \quad \eta = -(0,0179\theta + 0,241). \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (7) следует, что предельную глубину зоны осадки h_s можно определить в виде:

$$h_s = h_0 \left(\frac{q_s}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\eta}}. \quad (9)$$

Величина относительного уплотнения почвогрунта в границах волока определяется как:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} = \varepsilon + 1 = \frac{h_s}{H} + 1, \quad (10)$$

где: ρ – достигнутая плотность почвогрунта, ε - деформация уплотнения.

Радиальное давление q_r вдоль радиуса $r \geq a$, отсчитываемого от границы контактной площадки, описывается уравнением эллипса:

$$q_r = q_0 \sqrt{1 - (a/r)^2}. \quad (11)$$

Как видим, на границе площадки при $r=a$ величина $q_r=0$ и с ростом относительного расстояния r/a будет возрастать.

Предельное радиальное расстояние r_s , при котором величина q_r превысит величину несущей способности почвогрунта q_s , можно трактовать как размер максимальной зоны уплотнения в радиальном направлении от колеи или как ширину охранной полосы корневой системы подроста или оставляемых на корню деревьев. Таким образом, получим:

$$r_s = a \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{q_s^2}{q_0^2}\right)}}. \quad (12)$$

Используя соотношение (12) при исходных данных $q_s=30$ кПа и $q_0=41,64$ кПа установлено, что для одиночного хлыста диапазон изменения r_s составляет 0,25-0,30 м.

Выполнив аналогичные расчеты для более широкого диапазона изменения угла поворота хлыста ($\theta=0-45^\circ$), фиксировались предельные значения h_s , a , r_s , после чего оценивалась величина деформации уплотнения ε .

Установлено, что маневры трелевочной системы существенно влияют на величину ε (диапазон изменения ε составляет от 0,12 до 0,23) и, соответ-

ственно, на величину относительного уплотнения $\bar{\rho}$, тогда как размер охранной полосы остается в достаточно узком диапазоне $r_s=0,23-0,33$ м.

Затем был выполнен анализ совместного влияния цикличности и маневров трелевочной системы на величину относительного уплотнения $\bar{\rho}$. При этом число (N) проходов трелевочной системы по одному и тому же волоку учитывалось путем умножения расчетной величины ε на коэффициент $\lambda_N=1+\lg N$. Результаты анализа свидетельствуют о значительном диапазоне изменения величины $\bar{\rho}$ даже при трелевке одиночного хлыста.

Разработанная модель воздействия одиночного хлыста на почвогрунт явилась основой при расчете трелевки пачки аналогичных хлыстов в количестве $N_x=2, 3-10$ штук объемом до $V_x=6,5$ м³ и весом до $Q=32,5$ кН ($G=22,75$ кН). Получены следующие начальные параметры контакта при значении $N_x=10$: $h_0=0,117$ м; $a=0,363$ м; $R=1,13$ м; $q_0=78,3$ кПа, (13) для которых выполнены расчеты по выполнению критерия разрушения (6) на основе оценки компонент тензора напряжений (3). В конечном счете, были установлены параметры уплотнения почвогрунта $\bar{\rho}$ и размеры охранной полосы r_s .

Расчет показал, что абсолютные значения величины r_s существенно выросли и диапазон их изменения составил $r_s=1,1-1,6$ м. Деформация уплотнения грунта ε при этом также увеличилась и достигла значений 0,8.

Сопоставление полученных расчетных данных с опытными значениями изменения плотностей ρ почвогрунтов под движителем от естественного сложения до десятого двойного прохода трелевочной системы по волоку при трелевке пачки хлыстов позволило заключить, что процессы уплотнения почвогрунта от нагрузки движителем и пачкой хлыстов сопоставимы и характеризуются близкими по величине параметрами относительного уплотнения $\bar{\rho}$.

Ограничивая сверху величину $\bar{\rho}$ значением 2, что означает уплотнение грунта на всю глубину H зоны распространения деформаций, можно сделать вывод о том, что рост величины N диктует необходимость существенного снижения маневров трелевочной системы или соответствующего снижения веса трелеваемой пачки.

Представим результаты расчетов параметров уплотнения различных по своим свойствам почвогрунтов с учетом возможных их вариаций в пределах заданных границ волоков. Расчеты выполнены для трех разновидностей почвогрунтов волока. В зависимости от соотношения величин влажности почвогрунта W и его предела текучести W_T , выделим три категории: I - почвогрунты слабые ($W > W_T$), II - средние ($W = W_T$) и III - прочные ($W < W_T$).

Для всех категорий почвогрунтов определены: их плотность естественного сложения ρ_0 , модуль Юнга E , величина внутреннего сцепления C , угол внутреннего трения φ , несущая способность q_s , коэффициент Пуассона ν ,

параметры нагружения A , n и H . В табл. 1 приведены результаты расчетов величин h_o , a и q_o .

Основываясь на полученных начальных параметрах контакта оценивались: величина относительного уплотнения почвогрунта в границах волока, по выражениям (10) и (9) и размер r_s максимальной зоны уплотнения в радиальном направлении от колеи, т.е. ширина охранной полосы корневой системы подроста или оставляемых на корню деревьев, по выражению (12).

Таблица 1 - Оценка начальных параметров контактного разрушения почвогрунтов различной категории

Параметры	Категории почвогрунта		
	I	II	III
E , МПа	0,4	1	3
ν	0,35	0,25	0,15
C , кПа	5	12	24
φ , град	11	15	16
ρ_o , кг/м ³	750	850	950
q_s , кПа	40	60	80
A , м.е.	0,0215	0,0564	0,1671
n	1	1,0206	1,0888
H , м	0,8	0,4	0,3
h_o , м	0,173	0,117	0,074
a , м	0,443	0,363	0,289
q_o , кПа	52,67	78,34	123,53

Анализ соотношений (8), (10), (12) показывает, что показатели $\bar{\rho}$ и r_s при постоянстве параметров трелевки определяются начальными параметрами контактного разрушения, величиной несущей способности почвогрунта q_s и углом θ поворота трелевочной системы.

Определим значения показателей $\bar{\rho}$ и r_s . При прямолинейном движении трелевочной системы ($\theta=0$ град.) для почвогрунтов I категории показатели $\bar{\rho}$ и r_s составили соответственно $\bar{\rho}=1,67$ и $r_s=1,69$ м, для почвогрунтов II категории и - $\bar{\rho}=1,4$ и $r_s=0,93$ м и почвогрунтов III категории - $\bar{\rho}=1,28$ и $r_s=0,65$ м. Таким образом, при изменении величины $\bar{\rho}$ в диапазоне от 1,28 (почвогрунты крепкие) до 1,67 (почвогрунты слабые), т.е. на 30,5%, соответствующие значения r_s отличаются более чем в 2,5 раза. Это свидетельствует о необходимости детального учета характеристик почвогрунтов при проектировании трасс трелевки, если одной из целей является определение размеров защитных зон подроста.

Реализация математической модели для всех категорий почвогрунтов позволила выявить зависимости конечных показателей $\bar{\rho}$ и r_s от параметров

трелевки, в частности, количества хлыстов N_x , диаметра и длины хлыстов, высоты размещения пачки на конике h_k , угла θ поворота трелевочной системы и параметра цикличности N .

В частности, в таблице 2 приведены результаты расчетов показателей $\bar{\rho}$ (в числителе) и r_s (в знаменателе) при изменении одного параметра - N_x от 1 до 10 при постоянных значениях остальных параметров.

Таблица 2 - Расчетные показатели уплотнения различных почвогрунтов при изменении количества хлыстов в пачке

Параметр N_x	Категория почвогрунта		
	I	II	III
1	1,26/0,95	1,16/0,53	1,11/0,34
3	1,41/1,18	1,25/0,66	1,18/0,45
5	1,51/1,37	1,31/0,75	1,21/0,52
7	1,58/1,50	1,35/0,83	1,24/0,58
10	1,67/1,69	1,40/0,93	1,28/0,65

Установлен логарифмический характер зависимостей $r_s(N_x)$, показывающий, что наибольшее влияние параметр N_x оказывает в диапазоне значений до 4-6 штук хлыстов в пачке.

Принимая данные таблицы 2 в качестве базовых показателей, получены значения $\bar{\rho}$ и r_s в зависимости от изменения других параметров трелевки - h_k , θ и N . Полученные зависимости также подчиняются логарифмическому закону, и, как показал анализ, при изменении h_k в 2 раза (на 100%) изменение $\bar{\rho}$ не превышает 8%, т.е. влияние параметра h_k на процесс уплотнения почвогрунта можно считать не существенным. Аналогичный вывод сделан и при оценке влияния параметра h_k на значения показателя r_s .

Результаты исследований влияния угла θ поворота трелевочной системы на - величину уплотнения $\bar{\rho}$ и величину r_s , показывают что влияние углового параметра весьма существенное для всех категорий почвогрунтов. При этом кривые графиков $\bar{\rho}(\theta)$ и $r_s(\theta)$ по достижении определенных значений угла θ выходят на асимптотический уровень.

Несмотря на существенно большие по величине значения $\bar{\rho}$ и r_s для слабых почвогрунтов по сравнению с более крепкими, влияние углового параметра в слабых почвогрунтах значительно меньше.

Изучение влияния цикличности процесса уплотнения почвогрунтов различной категории с учетом возможных поворотов трелевочной системы показало, что этот параметр является значимым при определении принятых показателей уплотнения почвогрунтов трелевочной пачкой.

Поскольку невозможно выдержать постоянными такие параметры как угол θ и несущая способность почвогрунта q_s , осуществлен статистический

подход к определению показателей $\bar{\rho}$ и r_s при возможных вариациях параметров θ и q_s .

Принятая схема предусматривает выработку 100 случайных чисел ξ_i , распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Далее при заданных технологических параметрах трелевки задаемся различными математическими ожиданиями (M) параметров θ и q_s - $M(\theta)$ в диапазоне от 0 до 60 град. и $M(q_s)$ - от 40 до 80 кПа и их коэффициентами вариации (K_v) - соответственно $K_v(\theta)$ и $K_v(q_s)$ в диапазоне от 0 до 0,5 (50%-ая вариация).

Затем определяем 100 значений θ и q_s по формулам:

$$\theta_i = M(\theta)\{1 + k_v(\theta)\}, \quad q_{si} = M(q_s)\{1 + K_v(q_s)\}, \quad (14)$$

которые подставляем в соотношения (8), (10), (12) в результате чего получаем 100 значений показателей $\bar{\rho}$ и r_s .

Статистическая обработка выборок полученных значений $\bar{\rho}$ и r_s позволяет установить коэффициенты вариации $K_v(\bar{\rho})$ и $K_v(r_s)$.

Полученные данные позволяют, задавшись возможными отклонениями значений θ и q_s от своих математических ожиданий, установить для каждой исследуемой категории почвогрунтов допустимые пределы изменения показателей $\bar{\rho}$ и r_s .

Например, для второй категории почвогрунтов при $M(\theta)=10$ град. вариации значений θ и q_s в пределах 20% обеспечивают значения $K_v(\bar{\rho})=5\%$ и $K_v(r_s)=8\%$, что при $M(\bar{\rho})=1,5$ и $M(r_s)=1,08$ м устанавливает допустимый диапазон изменения $\bar{\rho}$ от 1,42 до 1,58, при этом показатель r_s может заполнить диапазон от 1 до 1,17 м. Отметим, что 20%-ая вариация означает достаточно стабильные условия трелевки. Более существенная вариативность параметров наблюдается при $K_v > 30\%$.

Еще один вывод связан с фактором влияния категории почвогрунта: чем слабее почвогрунты, тем изменчивость параметров θ и q_s обуславливает более широкие границы допустимых диапазонов изменения показателей $\bar{\rho}$ и r_s . Таким образом, разработанная математическая модель и полученные на ее основе результаты исследований позволяют определять как проектные значения параметров и показателей трелевки, так и допустимые диапазоны их изменений с целью стабилизации заданных показателей.

3. Экспериментальные исследования уплотнения почвогрунта в боковых полосах волока процессе трелевки пачки хлыстов. Описаны задачи экспериментальных исследований, выполнен выбор и обоснование, измеряемых показателей, описано приборное обеспечение экспериментальных исследований, дано обоснование точности измерения и достоверности эксперимента.

Эксперимент проводился в лабораторных условиях с использованием метрологически поверенного электронного динамометра сжатия ДЭС-3-И, включающего тензодатчик 101ВН и индикаторный терминал R320 с обработкой результатов с помощью специального программного обеспечения и ретрансляцией данных в приложения Excel.

При проведении исследований использовались модельные штампы, полученные из цилиндрических деревянных заготовок, подпиленные так, чтобы при их вдавливании в экспериментальный почвогрунт пятно контакта по геометрическим соотношениям повторяло пятно контакта комлей хлыстов при трелевке. Всего было использовано три вида штампов, параметры пятна контакта при вдавливании штампа, соотносились в том же масштабе, что и параметры пятна контакта при трелевке хлыстов по почвогрунту соответствующей категории по таблице 1.

Почвогрунт, отобранный с лесосеки, размещался в лотке так, чтобы расстояние от поверхности почвогрунта до дна лотка составляло 0,16, 0,08 и 0,06 м при исследовании уплотнения почвогрунтов первой, второй и третьей категории соответственно.

Соответствующий классу почвогрунта штамп, прикрепленный к круглой пластине диаметром 0,4 м, вручную погружался в размещенный в лотке почвогрунт, при этом пластина, к которой крепился штамп, плотно ложилась на поверхность почвогрунта. Далее штамп вместе с пластиной поворачивался на заданный угол θ , при этом измерительная аппаратура датчика фиксировала значение усилия, оказываемого на индикаторную часть тензодатчика со стороны деформируемого почвогрунта.

При проведении исследований основными независимыми контролируемые параметрами являлись: плотность почвогрунта, использовавшегося при испытаниях; показатель консистенции. Переменными факторами являлись: угол поворота штампа, θ ; расстояние от штампа до прилегающего слоя грунта, для которого производился замер сжимающего усилия при повороте штампа. Выходным параметром являлось максимальное сжимающее усилие, возникающее в прилегающем к штампу боковом слое почвогрунта при повороте штампа, P . На основании анализа было принято решение о проведении трехуровневого полнофакторного эксперимента.

4. Результаты исследований. В математических моделях армирующее действие корневой системы деревьев и кустарников на почвогрунт лесосеки принято учитывать через Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, и другие коэффициенты, значение которых определяют эмпирическим путем. Для определения содержания корней в почвогрунте обычно используют приборы для взятия проб почвы. Полученные керны почвогрунта высушивают, а затем выбирают части корней, взвешивают и определяют соотношение почвогрунта и корней. Чем корней больше – тем, при прочих равных условиях, почвогрунт прочнее. Такая методика является трудоемкой и неоперативной.

В диссертации предложена оригинальная конструкция ручного прибора для оперативного определения проективного покрытия корневых систем деревьев и кустарников. Он состоит из рукоятки, на которой крепится индикатор и полой штанги, к ней крепится рабочий орган прибора, представляющий собой площадку, 1,0x0,5 метра, прикрепленную в центре к штанге перпендикулярно. Внизу, в гнездах установлены подпружиненные иглы. Усилие пружин подбирается в зависимости от категории прочности почвогрунта (таблица 1). Под пятками игл установлены нормально разомкнутые контакты, соединенные в единую электрическую цепь, питающуюся от аккумулятора. Рабочий орган прибора соединен проводом, проходящим в полой штанге, с индикатором.

При вдавливании площадки с иглами в почвогрунт часть игл не встретит на своем пути корней и заглубится, не нажав при этом на контакт. Иглы, которые встретят на своем пути корень, или иное твердое препятствие, под усилием, прикладываемым испытателем к рукояти, преодолеют усилие пружин, вдавятся в гнездо и замкнут свои контакты.

Шкала индикатора отградуирована в процентах игл, замкнувших свои контакты. Т.е., если ни одна игла не встретила твердого препятствия (вариант песчаный пляж), то стрелка лежит на отметке 0. Если половина игл встретила препятствия то индикатор показывает значение 50, и т.д.

Помимо механической компоновки прибора, которая не является сложной, т.е. можно говорить о его небольшой стоимости в изготовлении и надежности в эксплуатации, разработаны варианты его электрической измерительной схемы, которые подробно описаны в работе.

Результаты экспериментальных исследований. Проведенные в лабораторных условиях эксперименты подтвердили достоверность составленной математической модели. После сопоставления расчетных данных, с полученными после обработки данных эксперимента экспериментальными зависимостями, для случая трелевки пачки хлыстов, сделан вывод о том, что в случае прогнозирования размера охранной полосы при трелевке пачки хлыстов с результатами опытов, расчетные данные отличаются от опытных не более, чем на 10 %.

Общие выводы и рекомендации:

1. Уплотнение и деформация почвогрунтов значительно влияют на экологическую эффективность лесосечных работ, которая входит в общий вектор эффективности лесозаготовительного производства. Волочащаяся часть трелеваемой пачки лесоматериалов вносит весомый вклад в уплотнение и деформацию почвогрунтов лесосек.
2. Разрушение почвогрунта трелеваемой пачкой реализуется через механизм сдвига, причем начальные вертикальные (сжимающие) напряжения по модулю на 30-40% превосходят радиальные (растягивающие) напряжения.

3. Интенсивность снижения суммарных сдвиговых напряжений от своих начальных значений по мере погружения в почвогрунт хлыста зависит от возможного угла его поворота в процессе трелевки пачки и при двукратном увеличении зоны осадки указанное снижение достигает 10-15% при нулевом угле отклонения и 40-50% при возрастании углового параметра до 25°.

4. Размер зоны уплотнения почвогрунта в радиальном направлении обоснован в качестве размера ширины охранной полосы корневой системы подроста, которая существенно зависит от углового параметра и требует увеличения на 25-30% при достижении угла поворота значений 20-25°.

5. Зависимость размера ширины охранной полосы от количества хлыстов в пачке для трех различных категорий почвогрунтов (слабых, средних и прочных) свидетельствует о том, что существует предельное значение хлыстов (для реализованной модели это 4-6 штук), по достижении которых увеличение размера зоны носит асимптотический характер.

6. Параметры цикличности проходов трелевочной системы и возможный угол ее поворота при трелевке пачки хлыстов являются доминирующими факторами, влияющими на уплотнение почвогрунта, в частности, при 5-кратном проходе системы и возможном угле ее поворота в 10 градусов величина уплотнения возрастает на 50-60% по сравнению с одиночным прямолинейным движением по заданному волоку.

7. В случае прогнозирования размера охранной полосы при трелевке пачки хлыстов с результатами опытов, расчетные данные отличаются от опытных не более, чем на 10%.

8. При составлении технологической карты на разработку лесосеки следует учитывать категорию почвогрунтов лесосеки (таблица 1) и исходя из результатов расчета размеров уплотняемой боковой полосы волока, с учетом прогнозного числа рейсов трелевочной системы по волоку, необходимо ограничивать допустимый объем трелеваемой пачки лесоматериалов.

9. Необходимо учитывать, что места повышенного износа волока приводят к увеличению маневрирования трелевочной системы, это, в свою очередь, приводит к переуплотнению боковых полос волока. Следует, по возможности, избегать примыкания куртин подроста главных пород и оставляемых на доразживание деревьев, особенно с поверхностной корневой системой к местам поворотов трелевочных систем, например перехода с пасечного на магистральный волок.

10. Предлагаемое техническое решение для оперативного определения проективного покрытия корневых систем деревьев и кустарников, направленное на повышение эффективности исследования лесосеки при ее подготовке к проведению лесосечных работ позволяет повысить эффективность исследования лесосеки путем расширения номенклатуры исследуемых показателей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Никифорова А.И., Язов В.Н., Барашков И.А., Рудов М.Е., Хахина А.М. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния почвогрунта при его уплотнении в процессе маневрирования трелевочной системы // Научное обозрение № 5, 2011. С. 239-249.
2. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Рудов М.Е., Свойкин Ф.В. Результаты экспериментальных исследований воздействия древесины на почву при различных способах трелевки // Системы. Методы. Технологии. 2011, № 4. С. 67-70.
3. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Рудов М.Е., Свойкин Ф.В. Математическая модель влияния маневрирования трелеваемой пачки древесины на почву лесосек // Системы. Методы. Технологии. 2011, № 4. С. 92-96.
4. Григорьев И.В., Шапиро В.Я., Рудов М.Е., Никифорова А.И. Математическая модель уплотнения почвы комлями пачки хлыстов при их трелевке // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки, 2012. № 6, С. 65-70.
5. Григорьев И.В., Макуев В.А., Шапиро В.Я., Рудов М.Е., Никифорова А.И. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2013. № 2. С. 112-118.
6. Рудов С.Е., Рудов М.Е., Барашков И.А., Хахина А.М. Методика определения характеристик колеи на трелевочных волоках / Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ, 2012. С. 52-54.
7. Григорьев И.В., Хахина А.М., Рудов М.Е. Пути совершенствования методики трассирования трелевочных волоков с учетом поворотов трактора / Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса». Кострома: КГТУ, 2012. С. 142-145.
8. Лепилин Д.В., Рудов М.Е. Оценка влияния пачки лесоматериалов на уплотнение почвогрунтов лесосеки при трелевке / Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка. Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. СПб.: СПбГЛТУ, 2011. С. 318-322.
9. Рудов М.Е. Обоснование расчетной схемы уплотняющего воздействия волочащейся части пачки лесоматериалов при трелевке / Материалы девятой международной научно-технической интернет-конференции Леса Росси в XXI веке - СПб.: СПбГЛТУ, 2012. С. 100-105.
10. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Постановка задачи об уплотнении почвогрунта пачкой хлыстов при трелевке в полупогруженном положении / Материалы республиканского научно-практического семинара-конференции "Инновационная система и методы использования и воспроизводства лесных ресурсов на базе новых технологий интенсивного лесопользования"-Петрозаводск: ПетрГУ, 2012. С. 46-48.
11. Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Рудов М.Е., Хахина А.М. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / Природные ресурсы

и экология Дальневосточного региона: материалы Международного научно-практического форума. – Хабаровск: ТГУ, 2013. С. 134-138.

12. Рудов М.Е., Устинов В.В. Теоретическое исследование воздействия волоочащейся части трелюемой пачки лесоматериалов на почвогрунт лесосеки / Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка. Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. С.

13. Рудов М.Е. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта боковых полос трелевочного волокна при трелевке хлыстов за вершины / Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов. Выпуск 6 / Под ред. В.И. Пятякина. – СПб: СПбГЛТУ, 2013. С. 157-167.

14. Рудов М.Е. Влияние волоочащейся части пачки лесоматериалов на деформацию почвогрунтов лесосеки при трелевке / Материалы тематических конференций Политехнического молодежного фестиваля науки. СПб.: СПбГПУ, 2012. С. 216-219.

15. Григорьев И.В., Рудов М.Е., Григорьева О.И. Влияние числа хлыстов в трелюемой пачке на уплотнение ею боковых полос волокна / Проблемно-ориентированные исследования процессов инновационного развития региона. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, Издательство: ООО "Verso", 2013. С. 19-20.

16. Никифорова А.И., Рудов М.Е., Григорьева О.И. Экспериментальные исследования уплотнения боковых полос трасс трелевки волоочащейся частью трелюемой пачки лесоматериалов / Материалы республиканской научно-практической конференции «Проблемно-ориентированные исследования: теория и практика». Петрозаводск: ООО «Verso». 2014. С. 37-39.

17. Лепилин Д.В., Рудов М.Е. Анализ зарубежных литературных источников по проблеме уплотнения почв различного строения / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции 25-27 марта 2014 г. № 2 часть 3 (7-3). Воронеж: ВГЛТА. 2014. С. 86-90. DOI: 10.12737/3195.

18. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности. Материалы республиканской научно-практической конференции, посвященной 75-летию ПетрГУ. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, Издательство: ООО «Verso», 2015. С. 9-11.

19. Рудов М.Е., Никифорова А.И., Хахина А.М. Повышение энергетической эффективности лесных машин // Воронежский научно-технический вестник. 2015, № 1. С. 58-61. DOI: 10.12737/10901.

20. Григорьев И.В., Ланских Ю.В., Рудов М.Е., Перевозчиков А.А., Куницкая Д.А., Ланских А.М., Никифорова А.И., Ланских В.Г., Григорьева О.И. Прибор для определения армирующей способности корневых систем покрытия почвогрунтов при исследовании лесосек. Патент на полезную модель № 152844. От 20.06.15.

21. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. № 1 (12). Том 3. Воронеж: ВГЛТА. 2015. С. 223-228. DOI: 10.12737/10628.
22. Никифорова А.И., Рудов М.Е. Перспективные направления исследований влияния параметров трелемой пачки на экологическую эффективность процесса трелевки / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. № 2-2 (13-2). Том 3. Воронеж: ВГЛТА. 2015. С. 259-262. DOI: 10.12737/11086.
23. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности. Материалы республиканской научно-практической конференции, посвященной 75-летию ПетрГУ. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, Издательство: ООО «Verso», 2015. С. 9-11.
24. Григорьев И.В., Рудов М.Е., Григорьева О.И., Ланских Ю.В. Определение армирующей способности корневых систем при исследовании лесосек / Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции Кострома: Изд-во КГТУ, 2015. - С. 135-139.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Петрозаводский государственный университет. Ученому секретарю диссертационного совета 212.190.03.