

А.С. Ильинцев, Е.Н. Наквасина

**ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ ВОЛОКОВ ПОРУБОЧНЫМИ ОСТАТКАМИ
НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОЧВ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛЕСОСЕК В СЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЕ ТАЙГИ**

Введение. В настоящее время на севере Русской равнины ведется рубка лесов, часто произрастающих в условиях временного избыточного поверхностного увлажнения, что связано с двучленными почвообразующими породами, широко распространенными в регионе. Пасечная технология разработки лесосек предусматривает проходы лесозаготовительной техники по волокам (технологическим коридорам), что приводит к разным видам нарушений почвенно-растительного покрова, ухудшает естественное возобновление и увеличивает мозаичность формирующихся после рубки условий [Cambí et al., 2015; Ilintsev et al., 2020; Ilintsev, Nakvasina, 2021]. Для разработки щадящих (природосберегающих) методов заготовки древесины и пересмотра технологических процессов в рамках устойчивого лесопользования и снижения уровня воздействия на лесные экосистемы [Зайкин и др., 2018] требуются исследования при разных условиях рубки и технологиях разработки лесосек.

Современные технологии разработки лесосек предусматривают многократные проезды техники по волокам (до 16) [Куляшов, Колотилин, 1993]. Недавние исследования [Nazari et al., 2023], проведенные в различных лесорастительных условиях, показали, что большое количество проездов техники (> 20 раз) приводит к максимальному повреждению почвы, хотя это противоречит общему мнению, что серьезные нарушения почвы происходят в течение первых нескольких проездов [Сюнев и др., 2008; Naghdi et al., 2017]. Число проездов, при которых происходит стабилизация воздействия на свойства верхних слоев почвы, на волоках, покрытых хворостяной подушкой из порубочных остатков, составляет от 1 до 5 [Катаров и др., 2012], а на волоках без покрытия – 8–9 [Сюнев, Давыдков, 2001; Ильинцев, Наквасина, 2021]. Метаанализ [Ampoorter et al., 2012] показал, что существенной связи между степенью уплотнения и интенсивностью движения не наблюдалось, а разная восприимчивость почв к повреждению определялась ее типом [Shabani, 2017]. Именно тип почвы, строение верх-

них горизонтов, их гранулометрический состав определяет степень ее повреждения при проходе груженной техники, прежде всего, колееобразования [Sirén et al., 2019], которое зависит от принятых мер защиты волока и покрытия его хворостяной подушкой. Необходимый объем хворостяной подушки для защиты почв на волоках зависит от влажности и гранулометрического состава почв, определяющих ее несущую способность, и составляет для гусеничных тракторов – $0,012 \text{ м}^3/\text{м}^2$, для колесных – $0,023 \text{ м}^3/\text{м}^2$ [Галактионов и др., 2009]. Технология защиты волоков аппроксимируется с типами леса [Галактионов, Кузнецов, 2011], что позволяет заранее организовать корректировку технологических параметров разработки лесосеки и предусмотреть превентивные меры защиты почвенного покрова.

Для условий лесосек с избыточным увлажнением почв важно определить возможности их защиты хворостяной подушкой из порубочных остатков, укладываемых на волоки, при разработке низкобонитетных древостоев V класса бонитета. По нашим данным, в черничном типе леса в северной подзоне тайги при запасе древостоев, поступающих в рубку, $115 \text{ м}^3/\text{га}$ объем порубочных остатков составляет в среднем $14,5 \text{ м}^3/\text{га}$ [Ilintsev et al., 2022]. При принятых технологических параметрах (ширина волока 4 м и пасека 18 м) объем порубочных остатков составляет $0,008 \text{ м}^3/\text{м}^2$, что ниже установленных ранее оптимальных значений [Галактионов и др., 2009]. Возрастает актуальность изучения устойчивости к действию лесозаготовительной техники специфичных для Европейского Севера почв на двучленных отложениях [Скляр, Шарова, 1970], особенностями которых являются их мелкий профиль и сложное и неоднозначное строение по гранулометрическому составу: верхняя часть профиля представлена супесью, нижняя (почвообразующая порода) в процессе эволюции и развития глеевых процессов – средним суглинком, подстилаемым тяжелосуглинистой мореной. Провоцируемый сложением почв застой влаги вызывает переувлажнение почв и снижает продуктивность насаждений. В то же время верхняя часть профиля имеет запас песчаных частиц, поддерживающих несущую способность почв.

Цель исследований – провести сравнительный анализ нарушений свойств почвы на волоках с покрытием порубочными остатками и без покрытия ими (с одинаковым числом проездов техники) в ельниках черничных низких бонитетов, произрастающих на избыточно увлажненных почвах в северотаежных лесах для корректировки технологических параметров разработки лесосек.

Материалы и методика исследования. Исследования проводили на лесосеке арендного участка ООО «Двинлеспром», территориально расположенного в междуречье С. Двины и Пинеги (Архангельская область, североазиатский лесной район европейской части РФ). Лесосека разрабатывалась комплексом лесозаготовительной техники, состоящим из харвестера Volvo EC210 и форвардера Ponsse Buffalo King, по общепринятой сортиментной технологии с покрытием волоков порубочными остатками. Длина гона техники на лесосеке составляла 70–100 м, что соответствовало 4 проездам техники. На 3 пасаках шириной 18 м обеспечили сравнительные варианты проезда форвардера, груженого 20 м³ еловых и березовых сортиментов (масса достигала около 39 т), с аналогичным числом проходов.

Исходный участок леса представлен ельником черничным V класса бонитета, состав 8Е2Б+С. Подрост на пасаках – ель (в среднем 733 шт./га) и редко встречающаяся береза, подлесок – шиповник, можжевельник, ива (в среднем 610 шт./га). В напочвенном покрове преобладают черника (из 10 представленных в травяно-кустарничковом ярусе видов) и зеленые мхи с проективным покрытием 79%. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса на пасаках, по сравнению со стеной леса (40%), снижено за счет повреждения напочвенного покрова при разработке лесосеки до 14%.

Почва на участке представлена подзолом грубогумусным поверхностно-осветленным иллювиально-железистым контактно-осветленным на двучленных моренных отложениях (тяжелосуглинистая морена, перекрытая покровными оглеенными супесями). Верхние горизонты (Е, ВНН) представлены супесью и легким суглинком, нижние, начинающиеся с 30 см (ВСг и С) – оглеенной до среднего суглинка супесью и тяжелым суглинком.

При проведении исследований на волоках в местах проезда лесозаготовительной техники обращали внимание на образование колеиности, строение и физические свойства дна колеи/мест проезда. Провели детальное изучение строения колеи, измеряя расстояние и просадку от условного уровня 30 см, маркируемого колышками и натянутой металлической лентой от уровня пасаки. В дне колеи/месте прохождения техники вскрывали почвогрунт и делали описание горизонтов/слоев почвы в соответствии с классификацией почв СССР 1977 г., а затем отбирали образцы ненарушенной лесной подстилки (на волоках с покрытием порубочными остатками) и почвы с глубин 0–10 см и 10–20 см для определения влажности и плотности сложения [Наквасина и др., 2007]. Для определения твердости исполь-

зовали твердомер Голубева. В качестве контроля отбирали подобные образцы на пасеке. Всего обработали 68 точек опробования. В камеральных условиях определяли плотность твердой фазы (пикнометрически) и рассчитывали скважности (общую и аэрации) [Наквасина, Любова, 2016].

Все статистические анализы выполняли на 5%-ном уровне вероятности. Для установления различий между исследуемыми вариантами применили тест Kruskal-Wallis ANOVA с последующим множественным сравнением средних рангов всех пар групп. Все данные анализировались с помощью программы Statistica версии 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

Результаты и обсуждение. На волоках, покрытых и не покрытых порубочными остатками, прежде всего обращает на себя внимание формирование колеиности. При покрытии волока порубочными остатками проседание почвы и образование колеи не просматривается, что отмечалось и другими авторами при подобных исследованиях [Катаров и др., 2012].

В то же время при отсутствии покрытия формируется типичная колея, имеющая среднюю ширину 81,4 см и глубину 9,6 см (от уровня пасеки). При этом четко просматривается образование межколеяного пространства и маркирующих края колеи валиков, сложенных из смеси лесной подстилки, растительности и минеральной почвы. За счет образования валиков реальная глубина колеи составляет в среднем 23 см (от верха валика до дна колеи). Валик на краю колеи состоит из раздробленных, перетертых трелевочной частиц и лишен структуры, быстро пересыхает. При выпадении даже небольшого количества осадков он расплывается, проседает и обрушивается [Григорьев и др., 2008]. Валики увеличивают перепады высот колеиности, но в то же время могут играть и положительную роль в выравнивании колеиности и расселении растительности со временем. Они насыщены органическим веществом, достаточно рыхлые и будут создавать благоприятные условия для поселения растительности. Твердость валика составляет $4,6 \pm 0,32$ мПА и соответствует твердости верхних слоев почвы на пасеке ($4,94 \pm 0,24$), тогда как твердость дна колеи достоверно выше ($6,1 \pm 0,21$ мПА).

При 4 проездах техники по волоку без покрытия формируется неровное дно колеи. При переезде через пни или в результате проседания задней груженной части машины могут образовываться углубления до 32 см, или, наоборот, микроповышения выше уровня пасеки за счет натаскивания почвы гусеничными лентами и цепями. Срез верхнего слоя почвы происходит из-за буксования лесозаготовительных агрегатов с механическими

трансмиссиями [Дручинин, 2017]. Занос почвы, особенно тяжелого гранулометрического состава с низкой несущей способностью, будет отрицательно сказываться на проходимости тяжелой техники [Вадбольская, Азаренок, 2015], нарушать строение почвы, вести к изменениям ее свойств и препятствовать восстановлению до естественного состояния [Ezzati et al., 2012].

В результате выявлено несколько вариантов строения дна колеи, учета их представленность и глубина повреждения колеи на изученных волоках, не покрытых порубочными остатками:

- органогенный горизонт Оао (лесная подстилка) перемешан с растительностью и порубочными остатками, толща смешанного горизонта составляет в среднем 5–6 (местами 2...12) см и лежит на подзолистом горизонте, слабо задетым перемешиванием в верхней части; доля таких повреждений дна колеи составляет 54%;

- горизонт Оао полностью перемешан с горизонтами Е и ВНФ, а также к нему примешана растительность и порубочные остатки. Горизонт Е полностью затронут перемешиванием гусеницами и не просматривается. Перемешанный горизонт (толщиной 2–12 см) может лежать на не перемешанных горизонтах ВНФ и С; доля таких повреждений составляет 17%;

- на перемешанные горизонты привнесена почва с других участков, сдвинутая гусеничными лентами и цепями при проходе техники. При этом сдвинутая почва чаще среднесуглинистого гранулометрического состава (горизонт Сg), может слоем до 4 см покрывать перемешанный слой или быть смешана с ним, повреждается толща дна на глубину 9–14 см; доля таких повреждений составляет 12%.

При 4 проходах техники по не защищенному порубочными остатками волоку только 17% площади на месте контакта с гусеницами остаются неповрежденными.

В то же время на волоках, покрытых порубочными остатками, перемешивания горизонтов не происходит, ниже лесной подстилки строение исходной почвы (Оае+Е+ВНФ) сохраняется. Однако наблюдается уплотнение верхнего подстилочного горизонта, что приводит к изменению его плотности сложения и полевой влажности (табл. 1).

В первую очередь наблюдается снижение мощности подстилки в местах прохода гусениц техники, различия с толщей подстилочного горизонта на пасеке достоверны ($p = 0,01$) и достигают 40% (табл. 2). Уплотнение лесной подстилки наблюдается и в межколейном пространстве ($p = 0,03$), что может быть вызвано свободными проездами техники по покрытому волоку, без приуроченности к ранее проложенным колеям.

Таблица 1

**Физические свойства лесной подстилки (горизонт Оао)
на волоках, покрытых порубочными остатками, и пасеке**

**Physical properties of forest floor (Oao horizon) on strip roads covered
with felling residues and cutting strips**

Вариант	Мощность, см	Полевая влажность, %	Плотность сложения, г/см ³
Пасека	4,6±0,28	417,9±45,89	0,06±0,004
Коля	<u>2,7±0,18</u> -40,6*	<u>396,1±130,94</u> -5,2	<u>0,11±0,007</u> +83,3
Межколейное пространство	<u>3,6±0,18</u> -21,3	<u>387,1±13,98</u> -7,3	<u>0,08±0,005</u> +25,0

Примечание: * – % в сравнении с пасекой.

Таблица 2

**Результаты теста Крускала-Уоллиса при множественных сравнениях
физических свойств лесной подстилки на разных участках**

**Results of the Kruskal-Wallis test for multiple comparisons
of the physical properties of the forest floor at different sites**

Физические свойства	Вариант		Парные (апостериорные) сравнения					
			Пасека vs. Коля		Пасека vs. Межколейное пространство		Коля vs. Межколейное пространство	
	Н	p	Z	p	Z	p	Z	p
Мощность, см	20,5	0,01	4,5	0,01	1,9	0,15	2,4	0,04
Полевая влажность, %	0,1	0,96	–	–	–	–	–	–
Плотность сложения, г/см ³	24,0	0,01	4,9	0,01	2,6	0,03	2,1	0,09

Примечание: Н – значение критерия Крускала-Уоллиса; Z – значение критерия при парных сравнениях; p – уровень значимости.

Уплотнение подстилки сказалось на ее плотности сложения в сторону увеличения ($p = 0,01$), как на местах прохода техники, так и в центре волока. С другой стороны, покрытие волока порубочными остатками предохраняет подстилку от высыхания и нивелирует ее влажность ($p = 0,96$), что может быть благоприятным для ее последующего разложения и отразиться

в насыщении верхних горизонтов почвы органическим веществом в дополнение к разлагаемому детриту.

В благоприятных условиях увлажнения организмы лесной подстилки будут способствовать деструкции мортмассы порубочных остатков, обеспечивая на определенном этапе восстановительной сукцессии поселение и рост лесных растений.

Наличие или отсутствие покрытия волоков порубочными остатками (еловые сучья) сказывается на физических свойствах 20-сантиметрового слоя почвы, изменяет ее водно-воздушный режим в местах прямого воздействия техники – следах (табл. 3).

Таблица 3

**Физические свойства почвы в колеях с разным обеспечением
покрытия волоков при 4 проходах техники**

**Physical properties of the soil in ruts with different coverage
of the felling residues after 4 passes of machinery**

Вариант	Полевая влажность, %	Плотность сложения, г/см ³	Сквашенность общая, %	Сквашенность аэрации, %	% образцов с почвой без воздушной фазы
0–10 см					
Пасека	27,9±1,78	1,45±0,047	47,6±1,69	10,2±1,82	0
Волок с порубочными остатками	<u>26,9±1,58</u> –3,7*	<u>1,49±0,036</u> +2,8	<u>46,2±1,31</u> –2,9	<u>8,1±1,44</u> –20,6	10
Волок без порубочных остатков	<u>29,3±1,93</u> +5,0	<u>1,54±0,051</u> +6,2	<u>40,4±1,98</u> –15,3	<u>3,6±1,77</u> –64,7	64
Межколейное пространство с порубочными остатками	<u>33,6±2,71</u> +20,3	<u>1,33±0,053</u> –8,3	<u>51,9±1,92</u> +9,0	<u>9,7±2,06</u> –4,9	7
10–20 см					
Пасека	29,1±1,83	1,41±0,066	47,9±2,430	12,4±1,67	0
Волок с порубочными остатками	<u>30,5±1,91</u> +4,9	<u>1,42±0,039</u> +0,7	<u>47,5±1,402</u> –0,9	<u>8,2±1,246</u> –33,8	20
Волок без порубочных остатков	<u>24,8±1,74</u> –14,6	<u>1,65±0,047</u> +13,8	<u>42,0±1,649</u> –12,3	<u>3,8±0,60</u> –69,4	21
Межколейное пространство с порубочными остатками	<u>35,4±2,71</u> +21,6	<u>1,31±0,060</u> –7,1	<u>51,5±2,219</u> +7,4	<u>7,7±1,85</u> –37,6	7

Примечание: * – % в сравнении с пасекой.

Покрытие волока порубочными остатками при 4 проходах тяжелой техники предохраняет почву с супесчаным гранулометрическим составом от уплотнения – плотность сложения в толще 0–20 см меняется незначительно по сравнению с пашней ($p = 0,5-1$, табл. 4). Без покрытия волока порубочными остатками, несмотря на перемешивание почвы с лесной подстилкой, растительностью, происходит заметное уплотнение почвы (на 6–14%, $p = 0,01-0,03$), особенно в нижнем слое (10–20 см), менее механически нарушенном гусеничными лентами форвардера.

Таблица 4

Результаты теста Крускала-Уоллиса при множественных сравнениях физических свойств почвы на разных участках

Results of the Kruskal-Wallis test for multiple comparisons of the physical properties of the soil at different sites

Физические свойства	Вариант		Парные (апостериорные) сравнения											
			Пашня vs. Волок с п/о		Пашня vs. Волок без п/о		Пашня vs. Междолевое с п/о		Волок с п/о vs. Волок без п/о		Волок с п/о vs. Междолевое с п/о		Волок без п/о vs. Междолевое с п/о	
	Н	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p
0–10 см														
Полевая влажность, %	4,8	0,19	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Плотность сложения, г/см ³	13,6	0,01	1,7	0,48	2,8	0,03	0,3	1	1,1	1	2,1	0,19	3,2	0,01
Скважность общая, %	18,3	0,01	0,7	1	2,8	0,03	1,3	1	2,2	0,15	2,0	0,29	4,1	0,01
Скважность аэрации, %	6,3	0,09	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10–20 см														
Полевая влажность, %	13,3	0,01	0,3	1	2,0	0,24	1,4	0,9	2,4	0,09	1,2	1	3,5	0,01
Плотность сложения, г/см ³	19,0	0,01	0,3	1	3,2	0,01	0,8	1	3,0	0,02	1,1	1	3,8	0,01
Скважность общая, %	13,9	0,01	0,4	1	2,5	0,07	0,7	1	2,1	0,19	1,1	1	3,1	0,01
Скважность аэрации, %	13,1	0,01	1,7	0,50	3,6	0,01	1,9	0,33	1,9	0,36	0,2	1	1,6	0,72

Примечание: Н – значение критерия Крускала-Уоллиса; Z – значение критерия при парных сравнениях; p – уровень значимости.

Аналогично плотности сложения меняется и общая скважность почвы в этих вариантах. Повышение плотности сложения вызывает закономерное снижение общей пористости почвы до 40–42%, что неблагоприятно для роста корней растений. При этом при уплотнении почвы происходит перераспределение крупных и мелких пор в сторону увеличения последних, что нарушает водно-воздушный режим и, прежде всего, сказывается на обеспеченности почвы воздухом.

На открытых лесосеках скважность аэрации почв пасеки в летнее время находится на предельных значениях (ниже 15%). Покрытие волока порубочными остатками способствует ее поддержанию, особенно в верхнем слое 0–10 см под лесной подстилкой. Ниже (слой 10–20 см) влажность почвы может несколько увеличиваться за счет выжимания ее из горизонта ВНФ, влажность которого составляла на время исследований более 40% за счет высокой пористости (62%).

В дне колеи, на волоках, не покрытых порубочными остатками, водно-воздушный режим почвы нарушается весьма заметно (все поры заняты водой, и расчетная скважность аэрации достигает отрицательных значений). Это связано с уплотнением почвы, нарушением системы крупных пор и выдавливанием влаги, в том числе из нижележащих горизонтов. Количество таких проб почвы (с преобладанием доли пор, занятых влагой) достигало 64 и 21% в верхнем и нижнем слое изучаемой толщи (10–20 см). На возможность сильного снижения пористости аэрации почвы в толще до 30 см на технологических волоках в условиях ельников черничных (на суглинистых почвах) до значений в 1–2% указывали [Серый и др., 1991]. Такое снижение аэрированности и повышение плотности сложения почвы критично, так как для роста корней растений требуется не менее 10% скважности аэрации от общего объема почвы, микробная активность и развитие корней могут быть серьезно ограничены, а продуктивность участка может снизиться [Siegel-Issem et al., 2005; Latterini et al., 2023]. На избыточно увлажненных почвах эти процессы выражены заметнее из-за насыщенности почвы влагой в середине почвенного профиля.

Заключение. При разработке лесосек по современной технологии с применением комплекса лесозаготовительных машин (харвестер и форвардер) в условиях ельников V класса бонитета на избыточно увлажненных почвах в северной подзоне тайги большое значение имеет применение мер защиты технологических волоков путем укладки порубочных остатков. Их применение при минимальном числе проездов техники не исключает негативных последствий повреждения почвенно-растительного покрова, однако способно минимизировать их. Негативное воздействие проявляется в уплотнении

лесной подстилки, однако хворостяная подушка из порубочных остатков предохраняет 20-сантиметровую толщу почвы от уплотнения и нарушения водно-воздушного режима, по сравнению с колеями, формирующимися при проезде по непокрытым хворостяной подушкой волокам.

При разработке подобных лесосек целесообразно следить за поддержанием волоков (пасечных, магистральных) в покрытом порубочными остатками состоянии. Однако, при большем числе проездов, имеющейся толщи порубочных остатков может не хватить, и повреждения могут быть выше. Это требует организации системных исследований на длинных волоках с разным числом проездов техники и рекомендаций производству при планировании лесосек отдавать предпочтение лесосекам с короткими волоками, что предусматривает снижение числа проездов и минимизацию повреждения почвенного покрова.

Сведения о финансировании исследования и благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>. Авторы выражают благодарность начальнику отдела лесоуправления ООО «Регион-лес» А.В. Студенцову, инженеру по лесопользованию ООО «Двинлеспром» А.Л. Лябзину и работникам ООО «Двинлеспром», принимавшим участие в планировании и постановке эксперимента на лесосеке, а также С.А. Рай и Е.А. Рай за помощь в постановке модельного эксперимента.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Вадбольская Ю.Е., Азаренок В.А. Снижение воздействия лесных машин на почву при рубках ухода // Леса России и хозяйство в них. 2015. № 3 (54). С. 36–40.
- Галактионов О.Н., Кузнецов А.В. Формирование структуры лесотранспортных путей лесосеки на лесотипологической основе // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8. С. 81–84.
- Галактионов О.Н., Кузнецов А.В., Пискунов М.А. Характеристики настила из лесосечных отходов и состояние грунта на трелевочном волокне // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2009. № 7. С. 90–95.
- Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоошащающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации: монография. СПб: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 317 с.
- Дручинин Д.Ю. Повреждение лесной почвенно-растительной среды при проведении лесозаготовительных работ // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: матер. Междунар. науч.-технич. конф.. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2017. С. 84–87.
- Заикин А.Н., Никитин В.В., Щербаков Е.Н., Муковнина М.В. Методика снижения объемов техногенного воздействия лесосечных машин на лесные экоси-

стемы на основе математического моделирования режимов их работы // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 5. С. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-54-61

Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колеиности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 168–182. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.168-182

Катаров В.К., Сюньев В.С., Раткова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные грунты // Resources and Technology. 2012. № 9 (2). С. 73–81.

Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. М.: Машиностроение, 1993. 286 с.

Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.

Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 124 с.

Серый В.С., Аникеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий вырубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера: сб. науч. трудов. Архангельск, 1991. С. 3–15.

Скляров Г.А., Шарова А.С. Почвы лесов Европейского Севера. М.: Наука, 1970. 269 с.

Сюньев В.С., Соколов А.П., Коновалов А.П., Катаров В.К., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йёнссуу: НИИ Леса Финляндии, 2008. 126 с.

Ampoorter E., Schrijver A., Nevel L., Hermy M., Verheyen K. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis // Annals of Forest Science. 2012. Vol. 69. P. 543–562. DOI: 10.1007/s13595-012-0199-y

Cambi M., Certini G., Fabiano F., Foderi C., Laschi A., Picchio R. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand // iForest. 2015. Vol. 9. P. 89–94. DOI: 10.3832/ifor1382-008

Ezzati S., Najafi A., Rab M.A., Zenner E.K. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran // Silva Fennica. 2012. Vol. 46, no. 4. P. 521–538. DOI: 10.14214/sf.908

Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia // iForest. 2020. Vol. 13. P. 531–540. DOI: 10.3832/ifor3371-013

Ilintsev A., Nakvasina E., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. The impact of modern logging on the forest environment of felling site in the context of climate change [Electronic resource]. Building a green, healthy and resilient future with forests : XV World Forestry Congress; 2–6 May 2022, Seoul, Republic of Korea. URL: <https://drive.google.com/file/d/190XjPT5JO83nfr-aQl-UWhW1Mke9qG7D/view?usp%20target=> (accessed November 10, 2023).

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of protection forest soils during logging operations // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 5. С. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116

Latterini F., Dyderski M.K., Horodecki P., Rawlik M., Stefanoni W., Högbom L., Venanzi R., Picchio R., Jagodziński A.M. A Meta-analysis of the effects of ground-based extraction technologies on fine roots in forest soils // Land Degradation and Development. 2023. P. 1–13. DOI: 10.1002/ldr.4902

Naghdi R., Solgi A., Zenner E., Najafi A., Salehi A., Nikooy M. Compaction of forest soils with heavy logging machinery // Silva Balcanica. 2017. Vol. 18. P. 25–39.

Nazari M., Arthur E., Lamandé M., Keller T., Bilyera N., Bickel S. A meta-analysis of soil susceptibility to machinery-induced compaction in forest ecosystems across global climatic zones // Current Forestry Reports. 2023. P. 1–12. DOI: 10.1007/s40725-023-00197-y

Shabani S. Modelling and mapping of soil damage caused by harvesting in Caspian forests (Iran) using CART and RF data mining techniques // Journal of Forest Science. 2017. Vol. 63. P. 425–432. DOI: 10.17221/125/2016-JFS

Siegel-Issem C.M., Burger J.A., Powers R.F., Ponder F., Patterson S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content // Soil Science Society of America Journal. 2005. Vol. 69. P. 215–226. DOI: 10.2136/sssaj2005.0215

Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryyänänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // Silva Fennica. 2019. Vol. 53. No. 2. P. 1–24. DOI: 10.14214/sf.10134

References

Ampoorter E., Schrijver A., Nevel L., Hermy M., Verheyen K. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, pp. 543–562. DOI: 10.1007/s13595-012-0199-y

Cambi M., Certini G., Fabiano F., Foderi C., Laschi A., Picchio R. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *iForest*, 2015, vol. 9, pp. 89–94. DOI: 10.3832/for1382-008

Druchinin D.Yu. Povrezhdenie lesnoj pochvenno-rastitel'noj sredy pri provedenii lesozagotovitel'nyh rabot [Damage to the forest soil and plant environment after logging operations]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Logging production: problems and solutions: materials of the International Scientific and Technical Conference]*. Minsk: BGTU, 2017. pp. 84–87. (In Russ.)

Ezzati S., Najafi A., Rab M.A., Zenner E.K. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 521–538. DOI: 10.14214/sf.908

Galaktionov O.N., Kuznetsov A.V. Formirovanie struktury lesotransportnyh putej lesoseki na lesotipologicheskoy osnove. *Uchenye zapiski petrozavodskogo state university*, 2011, no. 8, pp. 81–84. (In Russ.)

Seryj V.S., Anikeyeva V.A., Vyalykh N.I., Kubrak N.I. Izmenenie lesorastitel'nyh usloviy vyrubok pri sovremennyh lesozagotovkah [Changing Forest Site of Cuttings in Modern Logging]. *Proceedings of Environmental Studies in the Forests of the European North*, Arkhangelsk, AILiKh Publ., 1991 pp. 3–15. (In Russ.)

Shabani S. Modelling and mapping of soil damage caused by harvesting in Caspian forests (Iran) using CART and RF data mining techniques. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, pp. 425–432. DOI: 10.17221/125/2016-JFS

Siegel-Issem C.M., Burger J.A., Powers R.F., Ponder F., Patterson S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, vol. 69, pp. 215–226. DOI: 10.2136/sssaj2005.0215

Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryyänänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils. *Silva Fennica*, 2019, vol. 53, no. 2, pp. 1–24. DOI: 10.14214/sf.10134

Sklyarov G.A., Sharova A.S. Pochvy lesov Evropejskogo Severa [Forest soils of the European North]. M.: Nauka Publ., 1970. 269 p. (In Russ.)

Syunyov V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V., Seliverstov A., Gerasimov Yu., Karvinen S., Vyal'kkyu E. Sravnenie tekhnologij lesosechnyh rabot v lesozagotovitel'nyh kompaniyah Respubliki Kareliya [Comparison of wood harvesting methods in the Republic of Karelia]. Joensuu: NII Lesa Finlyandii, 2008. 126 p. (In Russ.)

Vadbol'skaya Yu.E., Azarenok V.A. Snizhenie vozdeystviya lesnyh mashin na pochvu pri rubkah uhoda [The reducing negative impacts of forest machinery on soils thinnings]. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih*, 2015, no. 3 (54), pp. 36–40. (In Russ.)

Zaikin A.N., Nikitin V.V., Shcherbakov E.N., Mukovnina M.V. Metodika snizheniya ob''emov tekhnogennogo vozdeystviya lesosechnykh mashin na lesnye ekosistemy na osnove matematicheskogo modelirovaniya rezhimov ikh raboty [Method of decrease of forest machinery technogenic impact on forest ecosystems based on operating modes simulating]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-5-54-61. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.11.2023

Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Влияние покрытия волоков порубочными остатками на повреждаемость почв при разработке лесосек в северной подзоне тайги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 22–37. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.22-37

Для условий лесосек с избыточным увлажнением почв важно определить возможности их защиты хворостяной подушкой из порубочных остатков, укладываемых на волокни, при разработке низкобонитетных древостоев. Это необходимо для корректировки технологических параметров разработки лесосек в северной подзоне тайги (Архангельская область) в связи с уязвимостью

почвенно-растительного покрова. В пределах лесосеки, разрабатываемой комплексом лесозаготовительной техники, выбрали участки с 4 проездами форвардера, груженого 20 м³ еловых и березовых сортиментов. Исходный участок леса представлен ельником черничным V класса бонитета, состава 8Е2Б+С, произрастающим на почвах с двучленными отложениями (верх профиля – супесчаный, низ – тяжелосуглинистый). Провели детальное изучение строения колеи, вскрывали почвогрунт и делали описание горизонтов/слоев почвы, определили влажность, твердость и плотность сложения в толще 0–20 см. В качестве контроля отбирали подобные образцы на пасеке. В камеральных условиях определили плотность твердой фазы и рассчитали скважности общую и аэрации (F). Установили, что применение порубочных остатков в объеме 0,008 м³/м², что характерно для данного типа леса, при минимальном числе проездов техники не исключает негативных последствий повреждения почвенно-растительного покрова, однако способно минимизировать их. Прежде всего, исключается образование колеи в местах проезда груженой техники. Негативное воздействие проявляется в уплотнении лесной подстилки, однако хворостяная подушка из порубочных остатков предохраняет 20-сантиметровую толщу почвы от уплотнения и нарушения водно-воздушного режима, по сравнению с колеями, формирующимися при проезде по непокрытым хворостяной подушкой волокам. При большем числе проездов имеющей толщину порубочных остатков может не хватить, и повреждения могут быть выше.

Ключевые слова: лесозаготовительная техника, волока, почва, уплотнение, защита порубочными остатками.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. Effects of felling residues reinforcement of the strip roads on soil damage after logging operations in the northern taiga subzone. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 22–37 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.22-37

For the conditions of cutting areas with excessive soil moisture, it is important to determine the possibilities of protecting them with a brush mats of felling residues on strip roads when felling low-bonity tree stands. This is necessary to adjust the technological parameters of the development of cutting areas in the northern taiga subzone (Arkhangelsk region) due to the vulnerability of the soil and vegetation cover. Within the boundaries of the cutting area, which was developed by a complex of logging machinery, we selected plots with 4 forwarder passages loaded with 20 m³ of spruce and birch assortments. The initial area of the forest was represented by blueberry spruce of the V class of bonitet, the stand composition was 80 percent represented by spruce, 20 percent by birch, and pine was a single, growing on soils with binomial deposits (the top of the profile is sandy loam, the bottom is silty clay). We conducted a detailed study of the structure of the ruts, opened the soil and made a description of the horizons / soil layers, determined the moisture, penetration resistance and bulk density in the thickness of 0–20 cm. As a control, we selected

similar samples at the cutting strips. The laboratory determined the particle density and calculated the total porosity and porosity of aeration. It was found that the use of felling residues in the amount of $0.008 \text{ m}^3/\text{m}^2$, which is typical for this forest type, with a minimum number of vehicle passes does not exclude the negative consequences of damage to the soil and vegetation cover, but is able to minimize them. First of all, this excludes the formation of ruts in the places where loaded vehicles passed. The negative impact is manifested in the compaction of the forest floor, however, a brush mats of felling residues protects the 20-cm – thickness of the soil from compaction and disturbance of the water-air regime, compared with the ruts on strip roads without felling residues. With a larger number of vehicle passes, the available thickness of the felling residues may not be enough, and the damage may be higher.

Keywords: logging machinery, strip roads, soil, compaction, protection by felling residues.

ИЛЬИНЦЕВ Алексей Сергеевич – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. WoS Resercher ID: N-6286-2019, ORCID: 0000-0003-3524-4665, SPIN-код: 1299-7037, AuthorID: 849116.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

ILINTSEV Aleksey S. – PhD (Agriculture), Senior researcher, Northern Research Institute of Forestry; WoS ResercherID: N-6286-2019, ORCID: 0000-0003-3524-4665, SPIN-код: 1299-7037, AuthorID: 849116.

163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

НАКВАСИНА Елена Николаевна – профессор Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук. WoS ResercherID: A-5165-2013 ORCID: 0000-0002-7360-3975, ScopusID: 35389250000, SPIN-код: 6797-9434 AuthorID: 132027.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: e.nakvasina@narfu.ru

NAKVASINA Elena N. – DSc (Agriculture), Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. WoS ResercherID: A-5165-2013, ORCID: 0000-0002-7360-3975, ScopusID: 35389250000, SPIN-code: 6797-9434, AuthorID: 132027.

163062. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: e.nakvasina@narfu.ru