

Анализ почвенного покрова сплошных вырубок с помощью беспилотного летательного аппарата

А. С. Ильинцев¹, Н. С. Черкасов²

¹ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства
Архангельск, 163062, Россия
E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Архангельск, 163002, Россия
E-mail: cherkasov.n.s@edu.narfu.ru

Представлены результаты изучения почвенного покрова 27 сплошных вырубок в северо-таёжном лесном районе Архангельской обл. С помощью беспилотного летательного аппарата были проведены измерения площади и определены классы почвенного покрова повреждений на сплошных вырубках в наиболее распространённых лесорастительных условиях. Камеральная обработка полученных снимков заключалась в создании из них ортофотопланов и ручного обозначения на каждой вырубке повреждений от проезда лесозаготовительной техники. Глубину колеи вычислили на основе разницы измерений между цифровой моделью рельефа и цифровой моделью местности с шагом измерений, равным 1 м. Полученные данные разделили на три класса повреждений: слабый — до 15 см, средний — от 15 до 30 см, сильный — более 30 см. Для сравнения данных использовали дисперсионный анализ Крускала–Уоллиса (H) и критерий Манна–Уитни (Z) на уровне значимости (p) 0,05. Установлено, что площадь повреждений почвенного покрова изменяется в диапазоне от 9,2 до 12,4 % от общей площади вырубки. Отмечено значительное влияние сезона заготовки древесины на долю повреждений почвенного покрова ($H = 6,98$; $p = 0,030$). На весенне-осенних вырубках отмечается наибольшая доля повреждённых почв по сравнению с зимними вырубками ($Z = 2,59$; $p = 0,029$). На свежих почвах преобладают слабые повреждения, на долю которых приходится 63,5 %, на средние повреждения — 27,0 % и на сильные повреждения — 9,5 % от общей площади повреждений. На влажных почвах также преобладают слабые повреждения, доля которых составляет 73,0 %, доля средних повреждений — 21,5 %, сильных — 5,5 %. Отмечено значительное влияние сезона заготовки древесины на распределение слабых ($H = 5,78$; $p = 0,050$) и сильных повреждений ($H = 9,91$; $p = 0,007$). Доля сильных повреждений увеличивается на летних вырубках до 9,3 % по сравнению с зимними вырубками, где она составляет всего 1,4 % ($Z = 3,09$; $p = 0,006$). Выявлено, что глубокие колеи приурочены к магистральным волокам и погрузочным площадкам, где отмечается наибольшее количество проездов лесозаготовительной техники. Кроме того, сильные повреждения почвы связаны с пониженными участками рельефа, а также прокладкой пасечных волоков через временные водотоки и заболоченные участки. Таким образом, с точки зрения устойчивого управления лесными ресурсами необходимо учитывать и минимизировать повреждения почвенного покрова.

Ключевые слова: заготовка древесины, лесозаготовительная техника, технологические элементы лесосек, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель местности, цифровая модель рельефа, повреждения почвы, колеиность

Одобрена к печати: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234

Введение

Лесозаготовительная деятельность оказывает существенное воздействие на лесные экосистемы, и основная доля антропогенной нагрузки приходится на лесные почвы (Дымов, 2020; Cambi et al., 2015; Pintsev et al., 2021). Масштабные исследования по оценке воздействия лесозаготовительной деятельности начались в начале XX в. и приобретают всё большее значение по мере увеличения использования технологий механизированной заготовки древесины (Огородняя и др., 2024; DeArmond, Ferraz, 2021; Picchio et al., 2020).

В современных условиях заготовка древесины осуществляется полностью механизированным способом по сортиментной технологии заготовки древесины (*англ.* cut-to-length system) с использованием многооперационной лесозаготовительной техники. Движение данной техники по лесным почвам часто создаёт видимые следы, которые варьируют от поверхностных отпечатков протектора шины или следов гусениц в верхнем горизонте почвы до образования колеи глубиной более 50 см, которые простираются в нижние минеральные горизонты почвы (Теринов и др., 2016; Ilintsev et al., 2021; Ring et al., 2021).

Изменение условий почвообразования после проезда лесозаготовительной техники влечёт определённые экологические последствия, которые должны быть сведены к минимуму (Labelle et al., 2022; Marchi et al., 2018). Хорошо известны многие из этих последствий (Cambi et al., 2015; Ilintsev et al., 2022), такие как эрозия, нарушение строения горизонтов, увеличение плотности сложения, снижение пористости и инфильтрации, изменение гидрологического и температурного режима почв и др. И наоборот, меньше внимания уделяют масштабам повреждений почвенного покрова, которые очень трудно оценить при традиционных наземных методах обследования больших площадей. В связи с этим изменяются полевые методы, используемые для анализа геоморфологических процессов и количественной оценки воздействия на почвенный покров, и наблюдается переход от традиционных методов к использованию дистанционного зондирования и методов проксимального зондирования (Talbot et al., 2017) для анализа пространственных повреждений почвенного покрова (Giannetti et al., 2017; Koren et al., 2015). Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и фотограмметрии в лесном хозяйстве считается новым методом инвентаризации применительно к составлению карт, оценке глубины и формы колеи (Heppelmann et al., 2022; Marra et al., 2021; Talbot et al., 2018).

В связи с этим целью нашего исследования было определение с помощью БПЛА масштаба и степени повреждений почвенного покрова на свежих сплошных вырубках в наиболее распространённых лесорастительных условиях Архангельской обл.

Район и методы исследования

На основании выписки из лесного государственного реестра и анализа космоснимков Landsat-8 на территории Сурского и Пюлавского участков лесничеств Сурского лесничества Архангельской обл. были подобраны 27 свежих (с давностью проведения рубки не более одного года) сплошных вырубок (*рис. 1*, см. с. 225).

Исходные лесные насаждения до проведения сплошных рубок были представлены спелыми и перестойными ельниками с запасом 90–200 м³/га (*табл. 1*).

Лесорастительные условия — от черничных свежих и влажных до долгомошных и травяно-сфагновых, которые широко распространены в регионе исследования. Преобладали низко- и среднеполнотные насаждения V и IV классов бонитета. По гранулометрическому составу почвы преимущественно суглинистые, встречались супесчаные на двучленных отложениях на тяжёлых суглинках. Площадь сплошных вырубок варьировалась от 7,7 до 46 га. Общая площадь подобранных вырубок составила 584,9 га.

Рассматриваемые лесосеки разрабатывались как в летний и зимний, так и в осенний и весенний периоды. Разработка лесосек проводилась по узкопосечной технологии: ширина технологических коридоров (пасечных и магистральных волоков) — 4–5 м, ширина пасек — 16–18 м. Валка деревьев, обрезка сучьев, раскряжёвка и измельчение порубочных остатков осуществлялись харвестером. Сбор и транспортировка сортиментов на лесопогрузочные пункты проводилась форвардером. Общая площадь технологических коридоров, прорубаемых при рубках, проектировалась размером не более 30 % площади лесосеки. Погрузочные пункты устраивались вдоль лесовозных дорог. Если площадь лесосеки была более 10 га, то площадь производственных объектов не превышала 5 %, если площадь лесосеки была 10 га и менее, то она достигала 0,40 га.

После подбора сплошных вырубок в приложении DJI Pilot были построены оптимальные параметры полётных миссий. На основе предыдущего опыта использования дрона DJI

мavic 2 pro была проведена съёмка сплошных вырубок с высоты 100 м со скоростью движения дрона 2,5 м/с и 80%-м наложением снимков. Съёмка производилась в два этапа: в конце июля и в начале сентября. Общая площадь аэрофотосъёмки для 27 сплошных вырубок составила 304 га. Площадь съёмки одной вырубке изменялась от 6,4 до 14,1 га (в среднем 10,3 га). Продолжительность полётных миссий составляла до 25 мин, результатом их получился набор снимков с высоким пространственным разрешением до 2 см на пиксель. Количество снимков на одну сплошную вырубку было в диапазоне 87–172 шт. (в среднем 143 шт.). Всего было получено 3855 снимков.

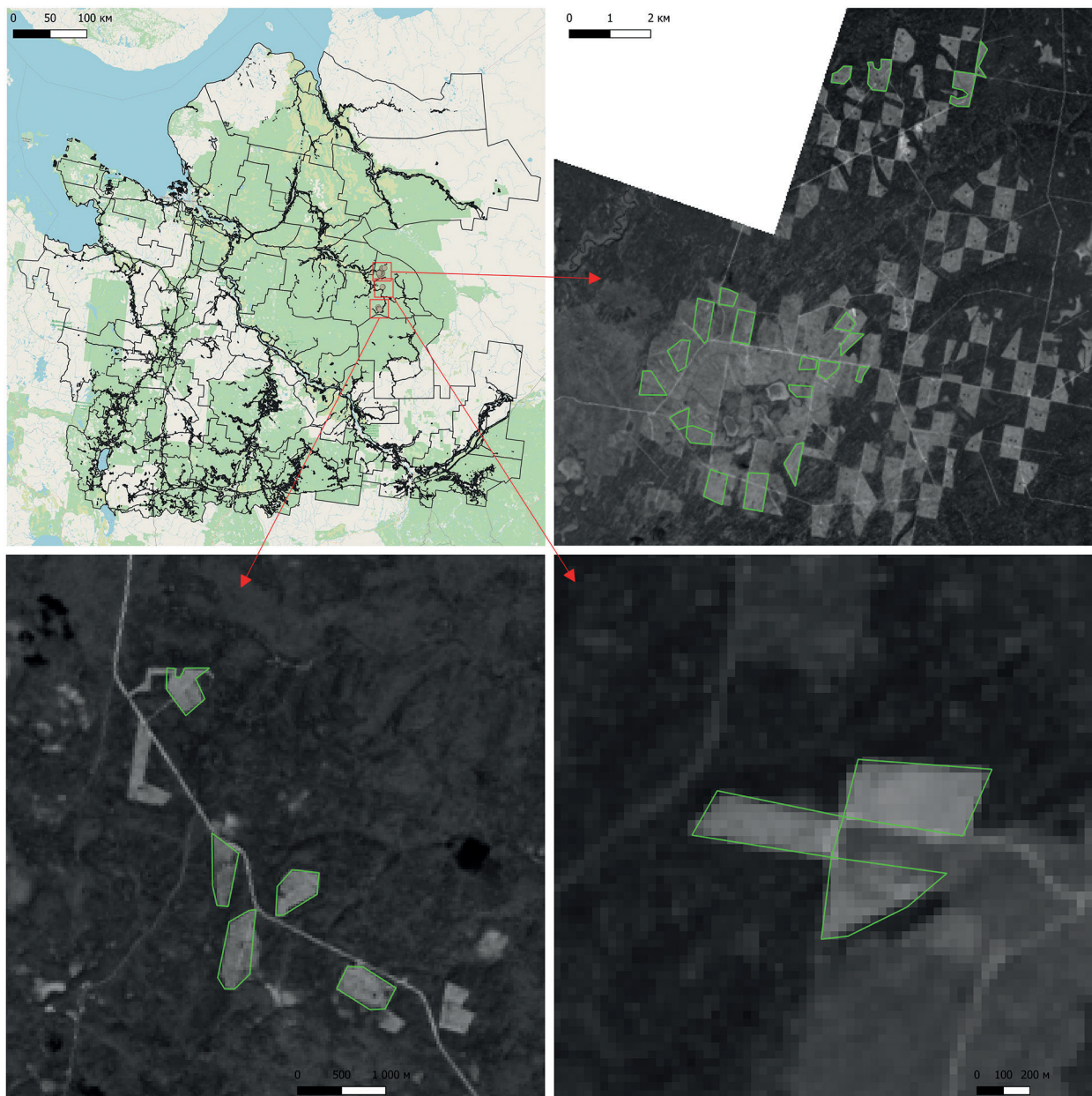


Рис. 1. Карта-схема расположения сплошных вырубок в Сурском лесничестве Архангельской обл.

Следующим этапом стала камеральная обработка полученных снимков в программе Agisoft Metashape Professional. После построения плотного облака точек и получения цифровой модели местности (ЦММ) вручную обозначили на каждой вырубке расположение повреждений почвенного покрова после проезда лесозаготовительной техники. Для этого был создан полилинейный векторный слой в программе QGIS (англ. Quantum Geographic Information System) и проведена ручная обрисовка колеи по их центру. Для получения

необходимой информации при помощи имеющихся линий следующим этапом добавили на все отрезки дополнительные точки вершин с одинаковым расстоянием между друг другом. В QGIS добавили точки с минимальным расстоянием между ними, равным 1 м. Получив так называемую «маску» в виде полилинейного векторного слоя с множеством вершин, перешли к этапу непосредственного измерения и получения величин площади и глубины поврежденных почв.

Таблица 1. Исходная характеристика лесных насаждений до проведения сплошных рубок

№ вырубки	Участковое лесничество	Площадь, га	Породный состав	Класс возраста	Запас, м ³ /га	Тип лесорастительных условий	Тип увлажнения почвы	Сезон заготовки		
1	Сурское	7,7	4Е4Е2Б	8	110	Чв	Влажные	Зимний		
2		10,4	4Е4Е2Б							
3		8,0	5Е4Е1Б							
4		22,7	7Е3Б	10	140	Тс	Свежие	Осенний		
5		18,6	7Е3Б							
6		33,2	8Е2Б			130	Чс	Свежие	Летний	
7		31,7	9Е1Б							
8		16,0	7Е3Б			165	130	Чв	Влажные	
9		38,2	7Е3Б			160				
10		24,0	9Е1Б			130	160	Чс	Свежие	
11		14,8	10Е+Б			160				
12		30,4	5Е2Е3Б			200	150	Тс	Влажные	Зимний
13		11,0	8Е2Б			140				
14		25,8	7Е3Б	150	160	Чс	Свежие			
15		40,0	7Е3Б	120						
16		46,0	8Е2Б	160	160	Чв	Влажные	Осенний		
17		17,7	10Е	160						
18		42,2	8Е2Б	200	Чс	Свежие	Влажные	Осенний		
19		10,0	7Е3Б							
20		12,1	7Е3Б							
21		11,2	8Е3Б	180	90	Дм	Влажные	Зимний		
22		21,0	8Е2Б							
23	Пюлавское	20,2	8Е2Б	9	160	Чв	Влажные	Весенний		
24		17,1	8Е2Б							
25		23,4	8Е2Б							
26		15,6	8Е2Б							
27		16,0	7Е3Б							
					130	Дм	Зимний			
					140			Влажные	Весенний	

Примечание: Породный состав представлен формулой, в которой приводятся сокращённые обозначения древесных пород и доли участия каждой древесной породы в составе, выражаемые в виде коэффициентов (целых чисел), каждая единица которого соответствует 10 % участия её в общем запасе; Е — ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Н. Karst), Б — берёза (*Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh.); Чв — черничный влажный, Тс — травяно-сфагновый, Чс — черничный свежий, Дм — долгомошный. Продолжительность класса возраста для хвойных древесных пород составляет 20 лет (<https://base.garant.ru/405366223/>).

Для определения глубины колеи относительно окружающего рельефа построили цифровую модель рельефа (ЦМР). Для этого использовалась комбинированная классификация об-

лака точек. Изначально применялась автоматическая классификация всех точек на отдельные классы, такие как «земля», «низкая растительность», «средняя растительность», «высокая растительность», «искусственные объекты» и «шум». После автоматического определения классов точек была проведена ручная классификация с целью задания ошибочно классифицированным точкам соответствующего значения. Для этого в режиме классификации плотного облака точек посредством инструментов выделения были отобраны отдельные точки и переназначены в соответствующий класс командой «назначить класс».

Среднее пространственное разрешение ЦММ и ЦМР составляло 2,5 см на пиксель. Плотные облака точек содержали в среднем 70 млн точек с точностью координат 1,2 см. Имеющиеся параметры позволили определить вертикальную точность цифровых моделей с ошибкой не более 2,5 см.

Вычислив разницу между ЦМР и ЦММ для каждой точки, получили глубину колеи с шагом измерений 1 м. Глубина повреждений была классифицирована по трём классам: слабые — до 15 см, средние — от 15 до 30 см, сильные — больше 30 см. Имея векторные линии на протяжении каждой колеи и применив к ним инструмент «калькуляция», получили общую протяжённость классов колеи для каждой отдельной вырубки. После измерения средней ширины колеи в разных участках вырубок было принято решение взять общую ширину, равную 1 м для одной колеи. Таким образом, получили площадь повреждения почв, после чего, рассчитав соотношение общей площади отснятого участка вырубки и площади повреждения, вычислили долю (в %) повреждения почвенного покрова.

Для сравнения двух выборок использовали критерий Манна–Уитни (*англ.* Mann–Whitney U-Test), а для сравнения нескольких выборок — дисперсионный непараметрический анализ Крускала–Уоллиса (*англ.* Kruskal–Wallis-Test ANOVA (*англ.* Analysis of Variance)). Двусторонние уровни значимости были скорректированы поправкой Бонферрони. После получения статистически значимого результата в дисперсионном анализе провели множественные сравнения (*англ.* post-hoc analysis) средних рангов для всех групп. Алгоритм заключался в попарном сравнении средних рангов всех групп, включённых в дисперсионный анализ. Все расчёты провели на 0,05-уровне значимости в программе Statistica 12.

Результаты и их обсуждения

Доля повреждённой площади на свежих и влажных почвах сплошных вырубок изменяется незначительно и держится в диапазоне от 9,2 до 12,4 % от общей площади (*рис. 2*).

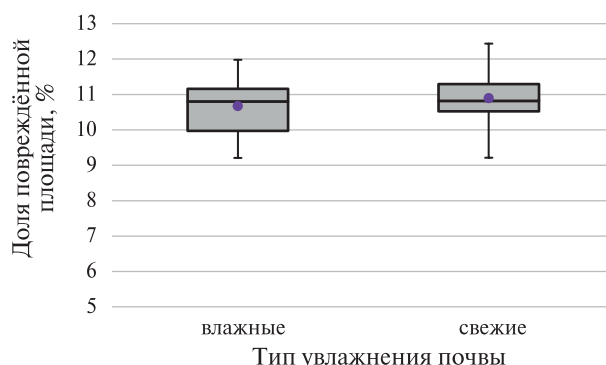


Рис. 2. Доля повреждённой площади в зависимости от типа увлажнения почвы (в %)

Отсутствуют достоверные различия в повреждении почвенного покрова между вырубками в зависимости от лесорастительных условий (*табл. 2*), это обосновывается тем, что освоение насаждений, произрастающих на влажных (сырых) почвах, происходит в основном в зимний лесозаготовительный сезон, когда наблюдается наименьшая доля повреждений.

Таблица 2. Результаты парного сравнения доли повреждённой площади в зависимости от типа увлажнения

Сумма рангов для влажных почв	Сумма рангов для свежих почв	<i>U</i> -критерий	<i>Z</i> -критерий	<i>p</i>
186	192	81	0,46	0,65

Пространственный анализ показывает некоторое увеличение доли повреждений почвенного покрова в связи с попаданием в зону съёмки магистральных волоков и погрузочных площадок, где отмечается наибольшее количество проездов лесозаготовительной техники, а также пониженных участков рельефа и проложенных пасечных волоков через временные водотоки и заболоченные участки (рис. 3).

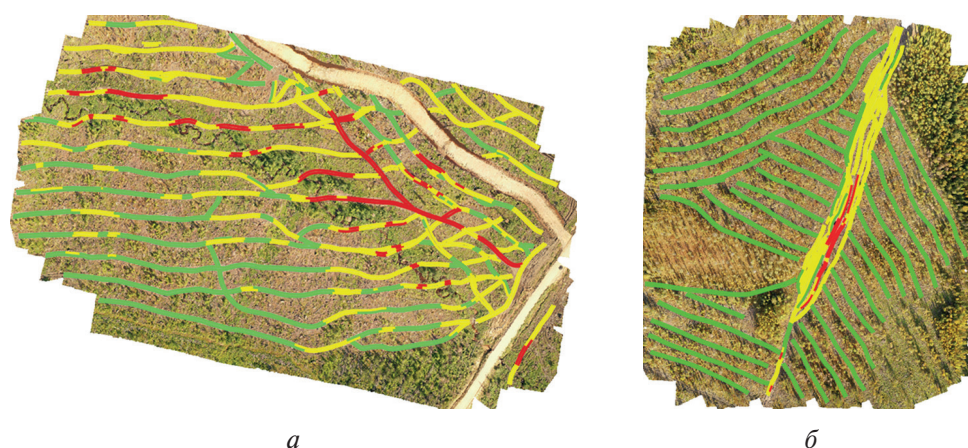


Рис. 3. Пример вырубок с максимальной долей повреждений: *а* — вырубка с пониженными участками рельефа и проложенными пасечными волоками через временный водоток; *б* — вырубка с магистральным волоком, на котором отмечено наибольшее количество проездов лесозаготовительной техники. Зелёным цветом обозначены слабые повреждения, жёлтым — средние, красным — сильные

Ранее проведённые исследования на начальном этапе внедрения многооперационной техники показали, что доля повреждённой почвы с различными типами повреждений составляла от 27 до 41 % (Цветков, 2000). При этом масштаб и степень повреждений почвенного покрова при заготовке древесины зависят от многих факторов (Цветков, 2000; Ilintsev et al., 2021; Picchio et al., 2020). Решающее значение имеют сезон заготовки древесины, применяемая система машин и технология лесосечных работ и тип лесорастительных условий (тип леса). Наименьшая площадь и степень повреждений отмечена при применении трелёвочных тракторов с чокерной оснасткой. Увеличивается антропогенная нагрузка при технологии, основывающейся на использовании многооперационных машин. Наиболее сильные повреждения установлены при применении валочно-трелёвочных машин.

Между тем отмечено значительное влияние сезона заготовки древесины на долю повреждений почвенного покрова (рис. 4 (см. с. 229), табл. 3).

На весенне-осенних вырубках отмечается наибольшая доля повреждённых почв по сравнению с зимними вырубками ($Z = 2,59$; $p = 0,029$). Отсутствуют достоверные различия в повреждении почв между летними и зимними вырубками ($Z = 0,82$; $p = 1$), а также между весенне-осенними и летними вырубками ($Z = 1,66$; $p = 0,290$).

Зимой почва замерзает при низкой температуре воздуха, а замёрзшая почва всегда обладает лучшей несущей способностью. Глубина замёрзшей почвы в первую очередь зависит от количества дней с температурой ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщины снежного покрова, содержания воды в почве и мощности отдельных горизонтов (Saarilahti, 2002). Лесосечные работы в зимнее время на замёрзшей почве более эффективны и вызывают меньшие повреждения почвенного покрова (Ilintsev et al., 2021; Susnjar et al., 2006).

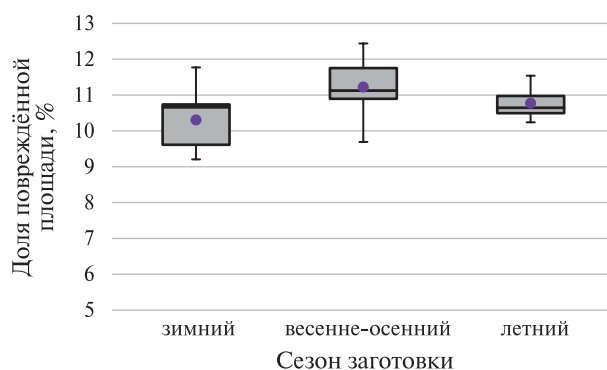


Рис. 4. Доля повреждённой площади в зависимости от сезона заготовки древесины (в %)

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа и множественного сравнения доли повреждённой площади в зависимости от сезона заготовки древесины

Сезон заготовки древесины		Парные (апостериорные) сравнения					
		Летний – весенне-осенний		Летний – зимний		Весенне-осенний – зимний	
<i>H</i> -критерий	<i>p</i>	<i>Z</i> -критерий	<i>p</i>	<i>Z</i> -критерий	<i>p</i>	<i>Z</i> -критерий	<i>p</i>
6,98	0,030	1,66	0,290	0,82	1	2,59	0,029

В зимнее время могут наблюдаться повреждения почвы, когда только замёрзли верхние горизонты почвы или когда температура почвы меняется в течение дня и почва оттаивает. В то же время если есть снежный покров и он тает, то содержание воды в почве увеличивается. Такая почва имеет низкую несущую способность, и почва может получить серьёзный урон на глубину замёрзшего слоя почвы (Ратькова и др., 2013).

Подтверждением вышеприведённым выводам выступает апостериорное сравнение классов повреждений почв, которое показывает увеличение доли сильных повреждений на вырубках со свежими почвами в летний сезон заготовки древесины (рис. 5 и 6).

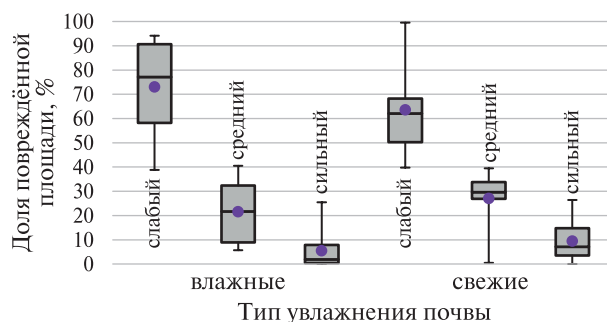


Рис. 5. Классы повреждений почв в зависимости от типа увлажнения почвы (в %)

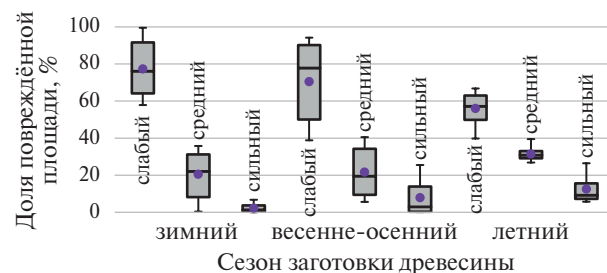


Рис. 6. Классы повреждений почв в зависимости от сезона заготовки древесины (в %)

На свежих почвах преобладают слабые повреждения, на долю которых приходится 63,5 %, на средние повреждения — 27,0 % и на сильные повреждения — 9,5 % от общей площади повреждений. На влажных почвах также преобладают слабые повреждения, площадь которых составляет 73,0 %, доля средних повреждений — 21,5 % и доля сильных повреждений — 5,5 % от общей площади повреждений. Отсутствует достоверная разница в доле площадей со слабыми и средними повреждениями на свежих и влажных почвах (табл. 4). На уровне статистической тенденции отмечается разница в доле сильных повреждений между свежими и влажными почвами ($Z = 1,58; p = 0,111$).

Таблица 4. Результаты парных сравнений классов повреждений почв в зависимости от типа увлажнения почвы

Класс повреждений почв	Сумма рангов для влажных почв	Сумма рангов для свежих почв	U-критерий	Z-критерий	p
Слабый	220	158	67	1,14	0,254
Средний	155	170	50	1,45	0,147
Сильный	144	207	53	1,58	0,111

Таблица 5. Результаты дисперсионного анализа и множественных сравнений классов повреждений почв в зависимости от сезона заготовки древесины

Класс поврежденный почв	Сезон заготовки древесины		Парные (апостериорные) сравнения					
			Летний – весенне-осенний		Летний – зимний		Весенне-осенний – зимний	
	H-критерий	p	Z-критерий	p	Z-критерий	p	Z-критерий	p
Слабый	5,78	0,050	1,47	0,426	2,39	0,049	1,01	0,927
Средний	1,96	0,375	–					
Сильный	9,91	0,007	2,16	0,092	3,09	0,006	0,99	1

Отмечено значительное влияние сезона заготовки древесины на количество слабых и сильных повреждений (табл. 5). Не удалось установить достоверного влияния сезона заготовки на количество средних повреждений ($H = 1,96; p = 0,375$), что связано с широким доверительным интервалом и высокой изменчивостью.

Доля слабых повреждений увеличивается на зимних вырубках до 76,2 % по сравнению с летними вырубками, где их доля составляет 57,2 % ($Z = 2,39; p = 0,049$). На весенне-осенних вырубках доля слабых повреждений на 22,6 % выше по сравнению с летними вырубками, но отсутствует достоверное различие ($Z = 1,47; p = 0,426$). Также отсутствует достоверное различие в слабых повреждениях между зимними и весенне-осенними вырубками ($Z = 1,01; p = 0,927$).

Доля сильных повреждений увеличивается на летних вырубках до 9,3 % по сравнению с зимними вырубками, где доля сильных повреждений составляет всего 1,4 % ($Z = 3,09; p = 0,006$). На весенне-осенних вырубках доля сильных повреждений на 2 % выше, чем на зимних вырубках, но различия незначительны ($Z = 0,99; p = 1$). На уровне статистической тенденции отмечаются различия в сильных повреждениях между летними и весенне-осенними вырубками ($Z = 2,16; p = 0,092$).

Схожие результаты по оценке доли повреждений с различной степенью были получены для 20 свежих сплошных вырубок в Норвегии, но без учёта сезона заготовки древесины. Так, доля слабых нарушений по данным съёмки с БПЛА составила 63,6 %, средних — 24,6 %, сильных 11,8 % от общей площади повреждений. Несмотря на то, что глубокие колеи часто занимают лишь небольшую часть площади сплошной вырубки, они играют ключевую роль в определении экологических показателей заготовки древесины (Bhatnagar et al., 2022).

Заключение

С помощью БПЛА и фотограмметрии можно достаточно точно определить площадь и классы повреждений почвенного покрова на сплошных вырубках больших площадей, что затруднительно при применении традиционных методов, при которых используют мерные рулетки и ленты. Степень повреждений увеличивается на вырубках, которые осваиваются в летний и весенне-осенний периоды, когда почва не покрыта устойчивым снежным покровом и не промёрзла. Особенно характерно увеличение доли сильных повреждений (образование глубоких колеи), когда почва насыщена влагой. Пространственный анализ показал, что наибольшие повреждения, которые представлены глубокими колеями, наблюдаются на магистральных волоках. Укладывание порубочных остатков на волоках позволяет снизить класс повреждений почвы при нескольких проездах лесозаготовительной техники. В тех местах, где недостаточно порубочных остатков, наблюдаются хорошо выраженные глубокие колеи от проезда лесозаготовительной техники.

Таким образом, с точки зрения устойчивого управления лесными ресурсами необходимо учитывать и минимизировать повреждения почвенного покрова в летний период и особенно в весенний и осенний. Полученные результаты исследования могут быть использованы при мониторинге антропогенно нарушенных почв и оценке воздействия на окружающую среду. Значительный интерес для лесной отрасли представляет разработка различных рекомендаций и нормативно-правовых документов, где могут быть установлены определённые критерии, в том числе допустимого повреждения и колееобразования.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Литература

1. Дымов А. А. Почвенные сукцессии в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. DOI: 10.34756/GEOS.2020.10.37828.
2. Огородняя С. А., Бутылкина М. А., Красиков С. Р., Дымов А. А. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республика Коми) // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2024. Т. 79. № 2. С. 15–25. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25.
3. Ратькова Е. И., Сюнев В. С., Катаров В. К. Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии // Resources and Technology. 2013. № 10(1). С. 73–89.
4. Теринов Н. Н., Герц Э. Ф., Безгина Ю. Н. Развитие техники и технологий лесозаготовок на Урале // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 2. С. 81–90. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.81.
5. Цветков В. Ф. Камо Грядеши (Некоторые вопросы лесоводства и лесоведения на Европейском Севере). Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2000. 253 с.
6. Bhatnagar S., Puliti St., Talbot B. et al. Mapping wheel-ruts from timber harvesting operations using deep learning techniques in drone imagery // Forestry. 2022. V. 95. Iss. 5. P. 698–710. DOI: 10.1093/forestry/crac023.
7. Cambi M., Certini G., Neri F. et al. Impact of heavy traffic on forest soils: A review // Forest Ecology and Management. 2015. V. 338. P. 124–138. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.022.
8. DeArmond D., Ferraz J., Higuchi N. Natural recovery of skid trails. A review // Canadian J. Forest Research. 2021. V. 51. P. 948–961. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0419.
9. Giannetti F., Chirici G., Travaglini D. et al. Assessment of soil disturbance caused by forest operations by means of portable laser scanner and soil physical parameters // Soil Science Society of America J. 2017. V. 81. No. 6. Article 1577. DOI: 10.2136/sssaj2017.02.0051.
10. Heppelmann J. B., Talbot B., Fernández C. A. et al. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations // Intern. J. Forest Engineering. 2022. V. 33. No. 2. P. 108–118. DOI: 10.1080/14942119.2022.2044724.
11. Ilintsev A. S., Nakvasina E. N., Högbom L. Methods of protection forest soils during logging operations (Review) // Russian Forestry J. 2021. № 5. С. 92–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116.
12. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E. et al. Influence of ruts on the physical properties of Gleyic Retisols after logging machinery passage // Scandinavian J. Forest Research. 2022. V. 37. No. 4. P. 254–263. DOI: 10.1080/02827581.2022.2085785.

13. Koren M., Slančik M., Suchomel J. et al. Use of terrestrial laser scanning to evaluate the spatial distribution of soil disturbance by skidding operations // *iForest*. 2015. V. 8. P. 386–393. DOI: 10.3832/ifor1165-007.
14. Labelle E. R., Hansson L., Högbom L. et al. Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: a comprehensive review // *Current Forestry Reports*. 2022. V. 8. P. 20–37. DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
15. Marchi E., Chung W., Visser R. et al. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 634. P. 1385–1397. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084.
16. Marra E., Wictorsson R., Bohlin J. et al. Remote measuring of the depth of wheel ruts in forest terrain using a drone // *Intern. J. Forest Engineering*. 2021. V. 32. Iss. 3. P. 1–11. DOI: 10.1080/14942119.2021.1916228.
17. Picchio R., Mederski P. S., Tavankar F. How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? // *Current Forestry Reports*. 2020. V. 6. P. 115–128. DOI: 10.1007/s40725-020-00113-8.
18. Ring E., Andersson M., Hansson L. et al. Logging mats and logging residue as ground protection during forwarder traffic along till hillslopes // *Croatian J. Forest Engineering*. 2021. V. 42. No. 3. P. 445–462. DOI: 10.5552/crojfe.2021.875.
19. Saarilahti M. Soil interaction model: Appendix report No. 8. Univ. Helsinki, Dep. Forest Resource Management, 2002. 37 p.
20. Susnjar M., Horvat D., Seselj J. Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian J. Forest Engineering*. 2006. V. 27. No. 1. P. 3–15.
21. Talbot B., Pierzchała M., Astrup R. Applications of remote and proximal sensing for improved precision in forest operations // *Croatian J. Forest Engineering*. 2017. V. 38. P. 327–336.
22. Talbot B., Rahlf J., Astrup R. An operational UAV-based approach for stand-level assessment of soil disturbance after forest harvesting // *Scandinavian J. Forest Research*. 2018. V. 33. No. 4. P. 387–396. DOI: 10.1080/02827581.2017.1418421.

Analysis of soil cover of clearcuts using unmanned aerial vehicle

A. S. Ilintsev¹, N. S. Cherkasov²

¹ Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk 163062, Russia
E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

² Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
Arkhangelsk 163002, Russia
E-mail: cherkasov.n.s@edu.narfu.ru

The article presents the results of a study of soil cover of 27 clearcuts in the north taiga forest of the Arkhangelsk Region. We used an unmanned aerial vehicle to measure the area and classes of soil disturbances on clearcuts in the most common forest conditions. Using desk processing of the obtained images, we created orthophotographs and manually marked disturbances caused by logging machinery on each clearcut. The depth of the ruts was calculated based on the differences in measurement between the digital surface model and the digital terrain model, with a measurement step of one meter. The data obtained were divided into three classes of disturbances: light (up to 15 cm), moderate (15 to 30 cm), and severe (more than 30 cm). To compare the data, we used the Kruskal–Wallis ANOVA test (H) and the Mann–Whitney U-Test (Z) at a 0.05 significance level (p). It has been established that the area of disturbances to the soil cover varies from 9.2 to 12.4 % of the total area of clearcut. We noted a significant influence of the timber harvesting season on the proportion of disturbances to the soil cover ($H = 6.98$; $p = 0.030$). The largest proportion of disturbed soils is observed in spring and autumn clearcuts compared to winter clearcuts ($Z = 2.59$; $p = 0.029$). On fresh soils, light disturbances prevail, accounting for 63.5 %, while moderate disturbances account for 27.0 % and severe disturbances for 9.5 % of the total disturbed area. On moist soils, light disturbances also prevail, the proportion of which is 73.0 %; the proportion of moderate ones is 21.5 % and the proportion of severe ones is 5.5 %. We noted a significant influence of the harvesting season on the distribution of light ($H = 5.78$; $p = 0.050$) and severe damages ($H = 9.91$; $p = 0.007$). The proportion of severe disturbances increases in summer logging to 9.3 % compared to winter logging, where the proportion of severe disturbances is only 1.4 % ($Z = 3.09$; $p = 0.006$). We revealed that deep ruts are confined to main skid trails and loading points, where the largest number of logging machinery passes is noted. In addition, severe soil

disturbances are associated with lowered terrain areas, as well as laying of secondary skid trails through temporary watercourses and wetlands. Sustainable forest management should be improved to limit and reduce negative soil cover disturbances.

Keywords: timber harvesting, logging machinery, technological elements of logging sites, unmanned aerial vehicle, digital surface model, digital terrain model, soil disturbances, rutting

Accepted: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234

References

1. Dymov A. A. *Pochvennyye suksessii v boreal'nykh lesakh Respubliki Komi* (Soil succession at boreal forests of the Komi Republic), Moscow: GEOS, 2020, 336 p. (in Russian), DOI: 10.34756/GEOS.2020.10.37828.
2. Ogorodniaia S. A., Butylkina M. A., Krasikov S. R., Dymov A. A., Physical properties of upper mineral horizons of cutting area (middle taiga, Komi Republic), *Lomonosov Soil Science J.*, 2024, Vol. 79, No. 2, pp. 15–25 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25.
3. Ratjkova E. I., Syunev V. S., Katarov V. K., Deformation properties of forest soils in Karelia affected by “freeze – defrost” cycles, *Resources and Technology*, 2013, No. 10(1), pp. 73–89 (in Russian).
4. Terinov N. N., Gerts E. F., Bezgina Y. N., Development of logging technology in the Urals, *Lesnoy zhurnal*, 2016, Vol. 2, pp. 81–90 (in Russian), DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.2.81.
5. Tsvetkov V. F., *Kamo Gryadeshi (Nekotorye voprosy lesovodstva i lesovedeniya na Evropeiskom Severe)* (Quo vadis (Some issues of silvics and silviculture in the European North)), Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2000, 253 p. (in Russian).
6. Bhatnagar S., Puliti St., Talbot B. et al., Mapping wheel-ruts from timber harvesting operations using deep learning techniques in drone imagery, *Forestry*, 2022, Vol. 95, Issue 5, pp. 698–710, DOI: 10.1093/forestry/cpac023.
7. Cambi M., Certini G., Neri F. et al., Impact of heavy traffic on forest soils: A review, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 338, pp. 124–138, DOI: 10.1016/j.foreco.2014.11.022.
8. DeArmond D., Ferraz J., Higuchi N., Natural recovery of skid trails: A review, *Canadian J. Forest Research*, 2021, Vol. 51, pp. 948–961, DOI: 10.1139/cjfr-2020-0419.
9. Giannetti F., Chirici G., Travaglini D. et al., Assessment of soil disturbance caused by forest operations by means of portable laser scanner and soil physical parameters, *Soil Science Society of America J.*, 2017, Vol. 81, No. 6, Article 1577, DOI: 10.2136/sssaj2017.02.0051.
10. Heppelmann J. B., Talbot B., Fernández C. A. et al., Depthtowater maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations, *Intern. J. Forest Engineering*, 2022, Vol. 33, No. 2, pp. 108–118, DOI: 10.1080/14942119.2022.2044724.
11. Ilintsev A. S., Nakvasina E. N., Högbom L., Methods of protection forest soils during logging operations (Review), *Lesnoy zhurnal*, 2021, No. 5, pp. 92–116, DOI: 10.37482/0536-1036-2021-5-92-116.
12. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E. et al., Influence of ruts on the physical properties of Gleyic Retisols after logging machinery passage, *Scandinavian J. Forest Research*, 2022, Vol. 37, No. 4, pp. 254–263, DOI: 10.1080/02827581.2022.2085785.
13. Koren M., Slančik M., Suchomel J. et al., Use of terrestrial laser scanning to evaluate the spatial distribution of soil disturbance by skidding operations, *iForest*, 2015, Vol. 8, pp. 386–393, DOI: 10.3832/ifor1165-007.
14. Labelle E. R., Hansson L., Högbom L. et al., Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review, *Current Forestry Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 20–37, DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
15. Marchi E., Chung W., Visser R. et al., Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 634, pp. 1385–1397, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084.
16. Marra E., Wictorsson R., Bohlin J. et al., Remote measuring of the depth of wheel ruts in forest terrain using a drone, *Intern. J. Forest Engineering*, 2021, Vol. 32, Issue 3, pp. 1–11, DOI: 10.1080/14942119.2021.1916228.
17. Picchio R., Mederski P. S., Tavankar F., How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? *Current Forestry Reports*, 2020, Vol. 6, pp. 115–128, DOI: 10.1007/s40725-020-00113-8.
18. Ring E., Andersson M., Hansson L. et al., Logging mats and logging residue as ground protection during forwarder traffic along till hillslopes, *Croatian J. Forest Engineering*, 2021, Vol. 42, No. 3, pp. 445–462, DOI: 10.5552/crojfe.2021.875.

19. Saarihahti M., *Soil interaction model: Appendix report No. 8*. Univ. Helsinki, Dep. Forest Resource Management, 2002, 37 p.
20. Susnjar M., Horvat D., Seselj J., Soil compaction in timber skidding in winter conditions, *Croatian J. Forest Engineering*, 2006, Vol. 27, No. 1, pp. 3–15.
21. Talbot B., Pierzchała M., Astrup R., Applications of remote and proximal sensing for improved precision in forest operations, *Croatian J. Forest Engineering*, 2017, Vol. 38, pp. 327–336.
22. Talbot B., Rahlf J., Astrup R., An operational UAV-based approach for stand-level assessment of soil disturbance after forest harvesting, *Scandinavian J. Forest Research*, 2018, Vol. 33, No. 4, pp. 387–396, DOI: 10.1080/02827581.2017.1418421.