

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЕЗДОВ ТЕХНИКИ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПРОФИЛЯ ВОЛОКА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ СВОЙСТВ ПОЧВОГРУНТОВ

М.А. Пискунов

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

piskunov\_mp@list.ru

Приведены результаты экспериментов по измерениям высоты микропрофиля волока, проложенного на лесосеке через участки, отличающиеся между собой несущей способностью почвогрунтов. Представлены данные о том, как меняется микропрофиль волока и как проявляется образование колеи на участках с разной несущей способностью в статистической обработке высотных координат профиля с увеличением общего количества проездов харвестера и форвардера. Проанализированы выборки, составленные из значений высот микропрофиля, измеренных вдоль волока в точках, расположенных друг от друга на расстоянии один метр. Показано, что с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин увеличивается дисперсия каждой последующей выборки, но с каждой новой серией проездов интенсивность увеличения дисперсии снижается, при этом выборки не подчиняются закону нормального распределения. Указано, что исключение значений высот микропрофиля, измеренных на участке волока, проходящего через зону почвогрунтов, отличающихся низкой несущей способностью, изменяет статистические характеристики выборок. Установлено, что последовательность значений высот, полученная на участках с высокой несущей способностью почвогрунтов, подчиняется закону нормального распределения независимо от количества проездов и разброс данных в большей степени связан с неоднородностью покрытия из лесосечных отходов, а не с глубиной колеи. В статистическом моделировании процессов изменения поверхностей волоков, связанных с проездами лесозаготовительных машин, рекомендуется рассматривать трелёвочные волока, проходящие через участки с разными свойствами грунтов, в отдельной классификационной группе транспортных путей. В моделях движения лесозаготовительных машин по таким путям, рекомендуется учитывать то, что статистические характеристики микропрофиля в разных частях волока отличаются и изменяются после каждого проезда машины.

**Ключевые слова:** трелевочный волок, глубина колеи, продольный микропрофиль, лесная почва, форвардер

**Ссылка для цитирования:** Пискунов М.А. Исследование влияния проездов техники на статистические характеристики микропрофиля волока в условиях изменяющихся свойств почвогрунтов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 140–152. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-140-152

Научные работы, посвященные влиянию лесозаготовок на лесные почвы, продолжают занимать заметное место в общем массиве публикаций по лесотехнической тематике. Одним из критериев, с помощью которого, с одной стороны, анализируется деформация почв, вызванная лесозаготовительным процессом, а с другой — оцениваются условия движения техники по лесосеке, выступает глубина колеи, образующаяся в местах проезда тракторов. Например, продавливание почвы в местах многократных проездов лесозаготовительных машин вызывает изменение продольного микропрофиля

поверхности волока и тем самым воздействует на скорость и плавность движения трактора [1, 2] или размер колеи оказывает влияние на рейсовую нагрузку трелевочного трактора [3] и силу сопротивления движению [4, 5].

В период с 2020 по 2025 годы разными исследователями были проведены эксперименты и получены сведения, которые дополняют ранее полученный объем информации, описывающий изменения в лесных почвах, вызванные проездами лесозаготовительных машин. Некоторые работы посвящены исследованиям образования колеи в местах движения форвардеров на лесосеках вследствие влияния различных факторов. В частности, в статье [6] определена средняя глубина колеи на опытных участках,

не покрытых лесосечными отходами, после четырех, восьми и 10 проездов по одному следу груженого форвардера модели Ponsse Buffalo King. Здесь наряду с определением средних значений, уделяется внимание существованию заметных различий в размерах колеи вдоль опытного участка.

Результаты измерений размера колеи при последовательных проездах по одному следу груженого форвардера модели Valmet 860.4 представлены в работе [7]. Измерения колеи проводились в отдельном сечении волока в течение 39 проходов машины. Как изменяется интенсивность колееобразования в процессе повторяющихся по одному следу движений восьмиколесного форвардера модели Ponsse Buffalo по сравнению с форвардером той же модели, но оборудованного дополнительной задней осью, представлено в работе [8], в которой показаны также изменения средних значений глубины колеи при 25 проездах машин.

В исследовании [9] для моделей форвардеров, оснащенных различными типами гусениц, определены размеры колеи при проходах машин по участкам, которые были расположены на торфяных почвах. Каждая модель машины совершала четыре проезда по одному следу. Размер колеи определялся для прямолинейных и криволинейных опытных участков. Среднее значение для прямолинейных участков определялось по трем сечениям, которые располагались через 1,25 м один от другого. На криволинейных участках фиксировались семь значений, расположенных через 2 м один от другого. Исследования показали заметный разброс в значениях глубины колеи, измеренных в разных сечениях. Так, при среднем значении колеи, подсчитанном на основании данных, полученных на всех участках, в 15,47 см, стандартное отклонение составило 7,59 см.

Средний размер колеи в процессе заготовки древесины с использованием форвардера модели Timberjack 1710B определен в работе [10]. Здесь авторы оперируют медианными значениями, которые определены по измерениям, выполненным по всей длине волока. Значения определялись после каждого проезда форвардера. Общее количество проездов составило 8. При этом также фиксировался размах выборки. Если после первого проезда медианное значение размера колеи лежало внутри диапазона 6...17 см, то после восьмого проезда — уже внутри диапазона 20...65 см.

В работе [11] измерялась глубина колеи при проездах колесных и гусеничных машин по 25-метровым опытным участкам волока, неукрепленным и укрепленным лесосечными

отходами. Авторы измеряли глубину колеи на каждом опытном участке в пяти сечениях, а затем определяли среднее, но после первых проездов машин было отмечено, что получаемые значения обладают широким разбросом.

В работе [12] показаны продольные микропрофили волоков длиной 50 м образовавшиеся после трех и 10 проездов форвардера модели Ponsse Elephant 8W. В среднем глубина колеи после трех проездов составила  $11 \pm 8$  см, после 10 проездов —  $27 \pm 12$  см. Отмечается, что в местах с более высокой влажностью почвы глубина колеи была заметно выше по сравнению с остальными участками. Максимальная глубина колеи после 10 проездов в отдельных местах достигала 66 см.

К текущему периоду накоплен большой объем теоретических и экспериментальных сведений о процессах образования колеи, позволяющий осуществлять моделирование последствий проездов лесозаготовительных машин по лесным почвам для участков с постоянными характеристиками почвогрунтов. Однако в работе [13] обращается внимание на то, что механические свойства почв и подстилающих грунтов меняются вдоль трелевочного волока. Дополнительное влияние на общую картину изменения размеров колеи вдоль волока и на продольный микропрофиль волока оказывают: пнево-корневая система, камни, неровности различного вида [14], локальные водотоки [15] и рельефные особенности [16]. Необходимо учитывать и неодинаковую плотность произрастания деревьев в границах лесосеки [17], которая также оказывает влияние на образование колеи посредством распределения проездов лесозаготовительных машин по схеме волоков и обуславливает присутствие на лесосеке незарабатываемых участков [18].

Средние или медианные показатели размера колеи, рассчитанные по нескольким значениям, взятым в разных местах волока, не в полной мере описывают характер ее изменения вдоль волока и не характеризуют изменение продольного микропрофиля всего волока вследствие интенсивного колееобразования. В работе [19] представлены карты лесосек со схемами волоков, которые подтверждают факт изменения глубины колеи по длине волоков, и это изменение связано не только с количеством проездов лесозаготовительных машин, но и с мозаичностью свойств почвогрунтов на лесосеке. В этой работе в качестве параметра изменения свойств рассматривается влажность почвогрунтов, связанная с глубиной залегания грунтовых вод.

В работе [20] рассматривают модели для оценки и прогнозирования глубины колеи на

лесных почвах в процессе многократных проездов лесозаготовительных машин. Показаны примеры схем волоков, полученных на лесосеках, где в разных сечениях одного и того же волока с одинаковым количеством проездов лесозаготовительных машин глубина колеи изменяется. В этой работе определяется статистическая связь между глубиной колеи и такими характеристиками почвы, как плотность, текстура, влажность и комплексные характеристики, оцениваемые через сопротивление почвы вдавливанию конусного штампа.

Сопоставление карт свойств почв с глубиной колеи, измеренной в различных местах схемы волоков, выполнено в работе [21]. Среди прочего в этих исследованиях авторы указывают на необходимость принятия во внимание фактора изменения свойств почв на лесосеке для прогнозирования проходимости лесозаготовительных машин, но требуются дополнительные исследования в отношении того, на основе каких характеристик и какого измерительного инструментария проводить картографирование свойств почв лесосек.

В статье [22] представлены результаты исследования систем волоков для 16 лесосек площадью от 1 до 40 га, для которых составлялись карты почв. Почвы на этих картах разделялись на следующие типы: почвы с низкой несущей способностью, почвы со средней и почвы с высокой несущей способностью. Представленный пример карты с обозначением различных участков показывает, что один и тот же волок на лесосеке может проходить по участкам с разной несущей способностью почвы. Доля площадей лесосек, приходящихся на участки с низкой несущей способностью почвы, в этих исследованиях изменялась от 0 до 19 %, а доля волоков с глубокими колеями (глубина колеи больше 10 см) — от 1 до 28 %.

Подтверждение того, что характеристики микропрофиля волока в отдельных условиях будут изменяться по его длине, находим в работе [23], где авторы моделируют микропрофиль поверхности лесосеки как нестационарный процесс. В работах [24, 25] указывается на то, что в общем случае микропрофиль волока является нестационарной случайной функцией, но нестационарность связывается с уклонами, подъемами и волнообразностью поверхности. В более ранней работе [26] приводятся данные о том, что полученные выборки значений микропрофиля вырубки не подчиняются закону нормального распределения случайной величины и авторы в конце этой статьи делают вывод о том, что статистические свойства микронеровностей вырубок изменяются от

участка к участку. Здесь в продолжение этих выводов представим следующую гипотезу: при некотором сочетании факторов статистические характеристики микропрофиля волока будут заметно изменяться с каждым новым проездом лесозаготовительной машины.

В связи с этим актуально проведение экспериментов, направленных на получение дополнительных сведений о том, как изменение размера колеи в условиях изменяющихся свойств почвогрунтов вдоль трелевочных волоков после серии проездов влияет на статистические характеристики микропрофиля поверхности. В качестве основной гипотезы исследования выступает положение о том, что если волок характеризуется неоднородностью свойств почвогрунтов, то в процессе увеличения проездов лесозаготовительных машин интенсивное колеобразование на участках с низкой несущей способностью статистически отразится на увеличении разброса значений высот микропрофиля относительно некоторого среднего значения колеи, образующейся на волоке.

## Цель работы

Цель работы — на основе натуральных экспериментов выполнение анализа статистических характеристик выборок, составленных из высотных координат микропрофиля трелевочного волока, обладающего участками с разной несущей способностью почвогрунтов, по которому осуществляются многократные проезды лесозаготовительных машин.

## Материалы и методы

Полевые эксперименты осуществлялись на лесосеке действующего лесозаготовительного предприятия в безморозный период (измерения проведены с 30 июня по 11 октября). Лесозаготовительные операции выполнены по сортиментной технологии с использованием харвестера модели John Deere 1270D и форвардера John Deere 1110D. Форвардер был оснащен гусеницами на задней тандемной тележке.

После визуального осмотра лесосеки и консультаций с операторами лесозаготовительных машин был подобран экспериментальный волок, который включал в себя продолжительный участок с отличающимися от основной части волока свойствами. Этот участок при визуальном осмотре был охарактеризован как участок с избыточным увлажнением. Волок подбирали таким образом, чтобы участок с низкой несущей способностью был непрерывным и занимал не менее 20 % общей длины волока.

Такая постановка исходных данных в дальнейшем облегчала статистическую обработку, особенно в тех случаях, когда была необходимость исключить из выборки значения высот микропрофиля участка с резко отличающимися свойствами. Перед основными лесозаготовительными операциями на пасеке, где проходил экспериментальный волок, определялся рельеф местности (рис. 1).

Общая длина экспериментального пасечного волока составила 80 м. Высота микропрофиля на пасечном волоке измерялась через каждый 1 м в следе лесозаготовительной машины. Рельеф местности и измерения глубины колеи осуществлялись с использованием лазерного нивелира модели Condrol Neo X200 и измерительной рейки. Измерялись высотные координаты микропрофиля в правой колее по ходу движения.

Всего было сделано четыре серии измерений. Измерения проводились по фактическому состоянию мест на момент измерений. Точки измерений не очищались от лесосечных отходов или от обрушившегося грунта с боковых сторон следа. Допускалось несовпадение мест измерений по сериям, поскольку проведение лесозаготовительных операций изменяет состояние среды и волока, а постоянное отслеживание расположения точек измерений представляется затруднительным вследствие необходимости соблюдения техники безопасности на лесосеке. Там, где продавливания почвы не было или оно было незначительным, измерения фиксировали локальное возвышение уровня волока над неповрежденной поверхностью пасеки по причине наличия в следе лесосечных отходов. В отдельных случаях повышение высоты микропрофиля было связано с попаданием пня в место измерения. Лесозаготовительные операции на волоке до проведения измерений не проводились.

Первую серию замеров выполнили после двух проездов харвестера, который разрабатывал пасечный волок, вторую — после двух проездов форвардера. В одну сторону форвардер собирал сортименты, в обратную сторону двигался в груженом состоянии. Во втором случае форвардер не проехал весь волок, а начал двигаться в обратную сторону после загрузки грузового отсека, поэтому вторая серия измерений завершилась по границе на волоке далее, по которой форвардер не ездил. Третья серия измерений осуществлялась еще после двух проездов харвестера и четырех проездов форвардера. Два проезда были связаны с тем, что форвардер укреплял сырые места лесосечными отходами. Завершающая четвертая серия измерений была выполнена еще после двух проездов харвестера и двух проездов форвардера.

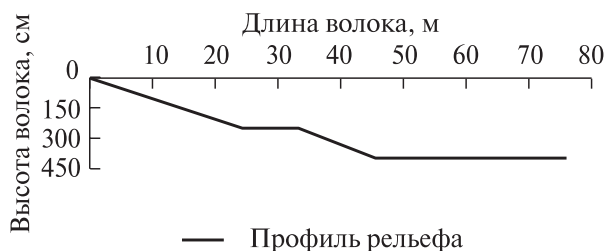


Рис. 1. Профиль рельефа волока

Fig. 1. The terrain characteristic of the skidding trail

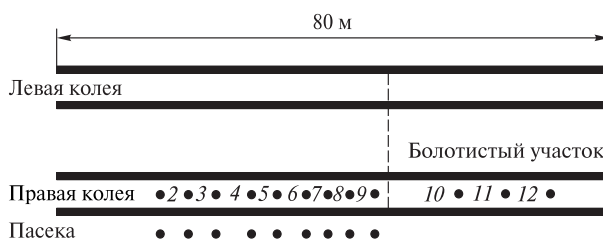


Рис. 2. Схема отбора проб

Fig. 2. Scheme of sample collection

Все проезды осуществлялись до конца волока и обратно. После этого движение по пасечному волоку больше не производилось.

После третьей и четвертой серий измерений, когда уже окончательно оформился след лесозаготовительных машин на волоке, был выполнен отбор проб грунта (рис. 2). Для части волока, приходящегося на сырой участок, количество проб было сокращено вследствие того, что визуальный осмотр состояния этого участка после первых проездов показал, что весь участок находится в условиях заболоченной местности и без дополнительного укрепления выдерживает один — два проезда лесозаготовительной техники. Пробы отобраны из мест, расположенных в следе колес трактора и из неповрежденного проездами трактора массива грунта рядом с волоком. Для каждой пробы определена плотность грунта и после сушки проб — массовая влажность грунта. Пробы грунта отобраны на глубине между 10 и 20 см от поверхности (табл. 1). Пробы 10–12, располагавшиеся на болотистом участке, отобраны только в колее после всех проездов лесозаготовительных машин.

Полученные массивы значений колеи были обработаны методами математической статистики, выборки проверены на соответствие нормальному закону распределения случайной величины. Для каждой выборки были определены средние значения и дисперсии. Далее из выборки исключались значения высоты микро-

**Плотность и массовая влажность проб грунта**  
**Density and moisture content of soil samples**

Номер пробы	Расстояние от начала волока до места отбора пробы, м	Третья серия измерений		Четвертая серия измерений		Пасека	
		Плотность в колее, г/см <sup>3</sup>	Массовая влажность, %	Плотность в колее, г/см <sup>3</sup>	Массовая влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Массовая влажность, %
1	15	1,41	20,8	1,59	19,5	1,87	18,4
2	19	–	–	1,79	18,1	1,49	19,8
3	23	1,68	22,2	1,61	22,1	1,23	15,9
4	28	1,75	19,8	1,71	13,3	1,32	7,4
5	32	1,49	19,5	1,56	17,3	1,34	20,6
6	37	1,87	17,1	1,38	20	1,57	17,9
7	40	–	–	1,66	19,8	–	–
8	42	–	–	1,39	22,8	0,86	34,4
9	46	–	–	1,53	35,1	1,15	31,8
10	62	–	–	0,79	900	–	–
11	65	–	–	0,82	925	–	–
12	69	–	–	0,89	1025	–	–

профиля с участка, приходящегося на почвогрунты с более низкой несущей способностью, и для этих выборок были определены средние значения и дисперсии. Для статистической обработки данных использовались средства пакетов Stadia 8.0 и Microsoft Excel 2010.

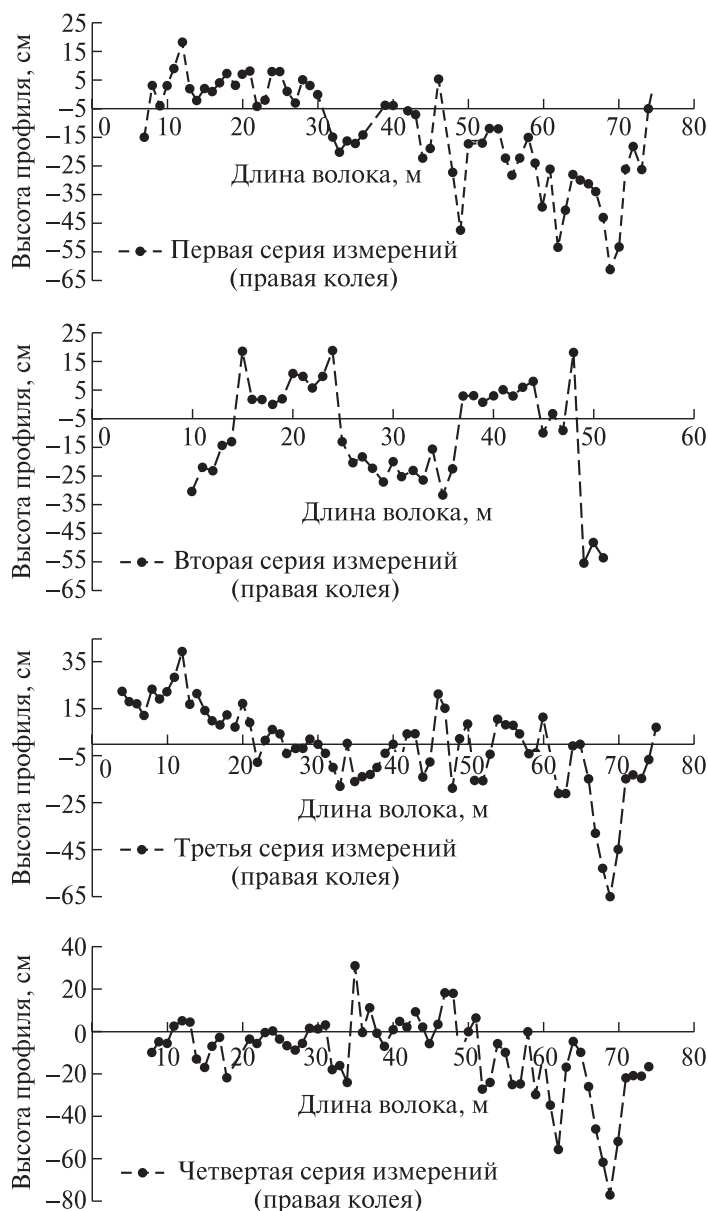
## Результаты и обсуждение

Измерена высота микропрофиля волока в правой колее для каждой серии измерений (рис. 3). Данные о свойствах почвогрунта и высоты микропрофиля поверхности после проездов машин позволили определить на волоке три характерных участка. Первый участок располагается в первой половине волока и характеризуется почвогрунтами с высокой несущей способностью, выдерживает многократные повторяющиеся проезды лесозаготовительной техники. Второй участок — переходный, находящийся в конце рельефного спуска и начинающийся с отметки 32 м. Этот участок характеризуется тем, что по мере приближения к третьему участку начинает возрастать влажность грунта. Образование колеи на этом участке связано с рельефными особенностями, т. е. микропрофиль волока изменяется в большей степени не вследствие продавливания, а по причине сдвига грунта. Третий участок характеризуется переувлажненными почвогрунтами с

низкой несущей способностью и располагается в заболоченном месте. Этот участок начинается с отметки 46 м от начала волока.

Первые два участка волока в данном эксперименте рассматриваются как участки с характеристиками микропрофиля, мало изменяющимися при проездах машин. Высота микропрофиля поверхности волока на этих участках изменяется главным образом в связи с неоднородностью покрытия из сучьев. Интенсивность образования колеи в ходе проездов техники по этим участкам рассматривается как незначительная по сравнению с третьим участком, на котором даже при целенаправленном формировании покрытия из лесосечных отходов наблюдается глубокая колея.

По результатам каждой серии измерений высоты микропрофиля составлялись выборки. Было получено четыре выборки, которые показывали изменение микропрофиля по длине волока после проездов техники. Для каждой полной выборки определялись среднее значение и дисперсия. Также осуществлялась проверка гипотезы о принадлежности выборки нормальному закону распределения случайной величины по критерию согласия Пирсона при уровне значимости 0,05. Аналогичные расчеты выполнялись для неполных выборок, из которых были исключены значения высоты микропрофиля, полученные на третьем участке



**Рис. 3.** Продольный микропрофиль волока после проездов лесозаготовительных машин

**Fig. 3.** Longitudinal microprofile of the skidding trail after logging machines transit

волока, характеризующимся переувлажненным почвогрунтом (табл. 2).

В табл. 2 не представлены результаты по выборке, составленной на основании второй серии измерений, вследствие того, что эти измерения проводились после проездов форвардера только по самому прочному участку, когда форвардер не заезжал на остальную часть волока с более низкой несущей способностью почвогрунта. Для второй серии измерений микропрофиль волока на слабом почвогрунте это, по сути, микропрофиль, полученный в первой серии измерений. Расчет по критерию Пирсона

показал, что полные выборки не подчиняются нормальному закону распределения, в то время как неполные выборки, из которых исключены значения высоты микропрофиля, измеренные на участках со слабонесущим почвогрунтом, подчиняются закону нормального распределения.

Анализ статистических характеристик, полученных для полных и неполных выборок значений высот микропрофиля волока, обнаруживает следующие закономерности. После каждой новой серии проездов дисперсия выборочных данных увеличивается, поскольку про-

Статистические характеристики микропрофиля волока  
Statistical characteristics of the skidding trail microprofile

Статистическая характеристика	Полная выборка			Неполная выборка		
	Первая серия	Третья серия	Четвертая серия	Первая серия	Третья серия	Четвертая серия
Среднее значение, см	-13	-1	-11	-3	5	-4
Дисперсия, см <sup>2</sup>	288	321	340	92	181	100
Эмпирическое значение критерия Пирсона	20,08	83,89	222,66	2,55	2,45	1,59
Критическое значение критерия Пирсона (0,05)	Число степеней свободы 5			Число степеней свободы 3		
	11,07			7,81		

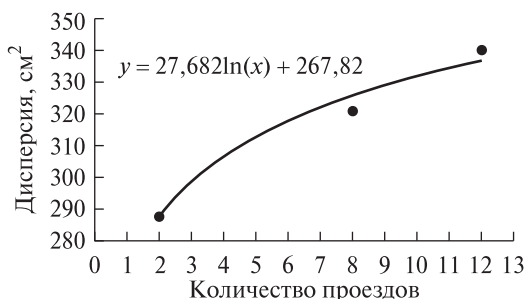


Рис. 4. Изменение дисперсии высот микропрофиля волока в зависимости от числа проездов техники  
Fig. 4. Varying in the height dispersion of the skidding trail microprofile depending on the number of logging machines passes

исходит увеличение глубины колеи с каждым новым проходом трактора на слабом участке, в то время как участки с грунтами, обладающими большей несущей способностью, которые и формируют в условиях данного эксперимента в большей степени в выборочных данных, средние значения, не подвержены сильному колееобразованию. По мере увеличения проездов интенсивность образования колеи становится меньше. В статистических данных это обнаруживается в изменении интенсивности увеличения дисперсии. По мере увеличения проездов тенденция увеличения дисперсии сохраняется, но интенсивность ее роста снижается, так как по мере увеличения проездов общая деформация поверхности волока, если на ней преобладают деформации уплотнения, стремится к некоторому пределу [27, 28]. В данном эксперименте изменение дисперсии по всей выборке с каждой новой серией проездов описывает логарифмический закон (рис. 4).

Однако следует признать, что для того чтобы делать окончательные выводы, требуется про-

ведение дополнительных экспериментов в других разнообразных условиях. Тем не менее, результаты эксперимента указывают на некоторую общую тенденцию.

Если рассматривать неполные выборки, когда из выборок исключены данные, полученные на слабом участке, то можно отметить, что дисперсия не получает заметного роста. Существует увеличение разброса данных для третьей серии измерений, однако это рассеяние связано с лесосечными отходами. Покрытие из лесосечных отходов на этом участке было уложено не равномерно, с наличием крупных скоплений отходов и свободных от отходов мест волока. Также отходы были еще не уплотнены проездами машин, поэтому наблюдались чередующиеся возвышения отходов над поверхностью. К четвертой серии измерений, когда проезды машин заметно уплотнили покрытие, рассеяние значений высот микропрофиля снизилось.

Подчинение неполных выборок нормальному закону распределения подтверждает то, что на слабodeформируемых участках с однородными свойствами, различные факторы в равной степени влияют на характеристики микропрофиля волока. Это согласуется с данными, принятыми при рассмотрении движения транспортных систем общего назначения по различным дорогам и путям [29]. Включение в общую выборку значений высоты микропрофиля, полученных на сильно деформируемом его участке, обнаруживает несоответствие полной выборки нормальному закону, что свидетельствует о более сильном влиянии на характеристики микропрофиля всего волока отдельного фактора или группы факторов, связанных со свойствами почвогрунта слабых участков.

В работе [30] представлены гистограммы распределения высоты неровностей микропрофиля пасечного и магистрального волоков.

Т а б л и ц а 3

**Статистические характеристики отдельных участков волока**  
**Statistical characteristics of skidding trail parts**

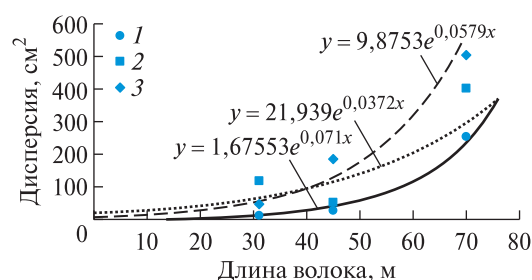
Участок волока	Первая серия измерений		Третья серия измерений		Четвертая серия измерений	
	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см <sup>2</sup>	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см <sup>2</sup>	Среднее значение высоты, см	Дисперсия, см <sup>2</sup>
Первый	2,8	17	11,6	120	-5,4	48
Второй	-12,3	35	-7,9	50	-0,9	187
Третий	-25,7	257	-9,5	403	-20,4	505

Авторы показывают, что значения высоты распределены по логарифмически нормальному закону распределения, а это является признаком существования неоднородности в данных, т. е. встречаются заметно отличающиеся значения, что соответствует условиям лесосек.

Эксперимент показал, что при прокладывании волоков через участки, которые характеризуются разными сильно отличающимися свойствами почвогрунтов, микропрофиль волока следует представлять как нестационарный процесс.

В работе [31] нестационарный микропрофиль предлагается рассматривать как процесс, собранный из некоторого числа стационарных процессов. В данном эксперименте отдельно определим средние значения и дисперсии для трех участков, которые были выделены на волоке. Введем положение, что имеет место нестационарность процесса по дисперсии и построим сглаживающие кривые, показывающие, как изменяется дисперсия по длине волока с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин.

Выполнены расчеты статистических характеристик выборок для отдельных участков (табл. 3) и построены сглаживающие кривые (рис. 5). Эти кривые имеют экспоненциальный вид, но не универсальный, так как продолжительный участок со слабыми почвогрунтами располагался в данном эксперименте в конце волока и свойства слабого участка очень сильно отличались от доминирующих свойств почвогрунтов по длине всего волока. Наличие таких участков в середине волока или периодическая их встречаемость в разных частях волока изменяет вид кривых. Почвогрунты со слабой несущей способностью оказывают существенно большее влияние в рассеяние значений высоты микропрофиля. Экспонента в данном эксперименте показывает разницу в увеличении разброса значений высоты ми-



**Рис. 5.** Изменение дисперсии по длине волока: 1 — первая серия измерений; 2 — третья серия измерений; 3 — четвертая серия измерений

**Fig. 5.** Modifying of the dispersion along the length of the skidding trail: 1 — the first series of measurements; 2 — the third series of measurements; 3 — the fourth series of measurements

кропрофиля относительно некоторого среднего значения для участков с разными свойствами почвогрунта в процессе повторяющихся проездов.

Участки, отличающиеся по своим свойствам, обнаруживаются в статистической обработке по изменению дисперсии выборок, составленных из значений высоты микропрофиля. Наличие участков с низкой несущей способностью показывает увеличение дисперсии с увеличением глубины колеи на этих участках для всего массива данных. Рост дисперсии замедляется с увеличением количества проходов, что объясняется снижением интенсивности деформации поверхности, вследствие стабилизации микропрофиля поверхности волока, поскольку на слабых грунтах основные деформационные процессы происходят на первых проездах тракторов [32]. Изменение дисперсии рассматривается как критерий, с помощью которого осуществляется анализ состояния волоков, проложенных по участкам, на которых свойства почвогрунтов не однородны, а изменяются в широких пределах.

При рассмотрении микронеровностей волока значимым фактором выступает присутствие покрытия из лесосечных отходов. Прежде чем покрытие деформируется от многократных проездов лесозаготовительных машин, наблюдаются выбросы значений микропрофиля вследствие локальных больших скоплений отходов и не однородностью их распределения вдоль волока. По мере деформации отходов разброс значений высоты микропрофиля снижается. Покрытие из отходов не влияет на общую тенденцию изменения высотных координат микропрофиля на слабых грунтах. В этом случае интенсивность разброса значений снижается, однако общая тенденция на увеличение разброса сохраняется.

Накопление статистических данных об изменении глубины колеи вдоль волоков при проездах машин представляется актуальным для моделирования и прогнозирования процессов на волоках, проходящих через участки с разными свойствами грунта. В качестве дополнительного фактора, подкрепляющего актуальность данных исследований, выступает получающаяся в последние годы тенденция на разработку технологических машин, способных работать в автономном режиме, для которых алгоритмы распознавания процессов являются основой для алгоритмов управления движением. В связи с этим, рассмотрение волоков, проходящих в местах с изменяющимися свойствами почвогрунтов, в отдельной классификационной группе транспортных путей в процессе решения отраслевых задач, представляется целесообразным.

## Выводы

Представлены результаты эксперимента по измерениям микропрофиля волока, проходящего через участки лесосеки с разной несущей способностью почвогрунтов. Экспериментальный волок был проложен таким образом, чтобы часть волока попадала на заболоченный участок с низкой несущей способностью грунта.

Измерения высотных координат микропрофиля проводились на одном и том же волоке в точках, расположенных на расстоянии один метр друг от друга. Было сделано четыре серии измерений. Каждая последующая серия измерений осуществлялась после того, как харвестер и форвардер осуществляли очередные проезды по волоку. Таким образом, были получены выборки, составленные из значений высот микропрофиля одного и того же волока, но после разного количества проездов техники.

Статистическая обработка полных выборок показала, что с увеличением количества проездов лесозаготовительных машин увеличивается дисперсия выборки, полученная после очередной серии проездов. При этом полные выборки не подчиняются закону нормального распределения. Наличие на волоке участков с низкой несущей способностью почвогрунтов, на которых после каждого проезда харвестера или форвардера значительно увеличивается глубина колеи, и показывает увеличение дисперсии в каждой выборке. По мере увеличения проездов интенсивность образования колеи на слабых участках снижается. Это проявляется и в изменениях значений дисперсии, её значение также увеличивается, но менее интенсивно.

Анализ неполных выборок, из которых были исключены значения высот микропрофиля, относящиеся к участкам со слабой несущей способностью почвогрунта, показал, что такие выборки подчиняются закону нормального распределения независимо от количества проездов. Разброс данных здесь в большей степени связан с неоднородностью покрытия из лесосечных отходов, а не с глубиной колеи, так как на таких участках образование колеи менее интенсивное. При моделировании движения лесозаготовительных машин по волокам, проходящим через участки с разной несущей способностью, рекомендуется рассматривать каждый следующий проезд лесозаготовительной машины, как движение по транспортному пути с изменившимися статистическими характеристиками поверхности по сравнению с предыдущим проездом и, одновременно, с изменяющимися характеристиками поверхности по длине пути.

## Список литературы

- [1] Григорьев И.В., Цыгарова М.В., Жукова А.И., Лепилин Д.В., Есин Г.Ю. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелевочной системы с волоком // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование 2011. Вып. 2(12). С. 47–54.
- [2] Жуков А.В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.06.02. Ленинград, 1978. 36 с.
- [3] Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунова Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 3. С. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
- [4] Жуков А.В., Лой В.Н. Оценка влияния глубины колеи на силу сопротивления качению колесной тре-

- левочной машины // Леса Европейского региона — устойчивое управление и развитие: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 4–6 декабря 2002 г. Минск: Изд-во БГТУ, 2002. Ч. 2. С. 198–201.
- [5] Лой В.Н. Оценка силы сопротивления качению колесной трелевочной машины с учетом деформации лесных почвогрунтов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2002. № 2. С. 44–47.
- [6] Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колеиности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 237. С. 168–182.  
<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.168-182>
- [7] Pandur Z., Kopssek H., Šušnjarić M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes // iForest, 2022, no. 15, pp. 476–483. DOI: 10.3832/ifor4138-015
- [8] Fjeld D., Østby-Berntsen Ø. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development — a Norwegian field study // International J. of Forest Engineering, 2020, no. 31(3), pp. 192–196.  
<https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>
- [9] Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Mola-Yudego B., Prinz R., Väättäinen K., Talbot B., Routa J. The effect of bogie track and forwarder design on rut formation in a peatland // International J. of Forest Engineering, 2021, no. 32(sup1), pp. 12–19.  
<https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1935167>
- [10] Bumber Z., Đuka A., Popović M., Poršinsky T. Soil characteristics in oak lowland stand — a case study of a 6-wheeled forwarder's impact on forest soil // Croatian J. of Forest Engineering, 2024, no. 45(1), pp. 85–95. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2362>
- [11] Никитин В.В., Скрышников А.В., Бавыкина Е.Г., Викулин И.А., Брюховецкий А.Н., Бойков П.А. Оптимальное размещение лесотранспортной сети на модели местности // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы нац. науч.-практ. конф. Воронеж, 19–21 апреля 2022 г. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. Ч. I. С. 99–120.
- [12] Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Science, 2022, v. 55, no. 11, pp. 1633–1646.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>
- [13] Большаков Б.М. Снижение отрицательных последствий от воздействия трелевочных систем на лесную почву: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Санкт-Петербург, 1998. 61 с.
- [14] Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрышников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 139–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155
- [15] Ильинцев А.С., Черкасов Н.С. Анализ почвенного покрова сплошных вырубок с помощью беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2024. Т. 21. № 4. С. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234
- [16] Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 6. С. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса, Вологда, 01–02 декабря 2015 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2016. С. 32–37.
- [18] Макаренко А.В. Проектирование схем трелевочных волоков на лесосеке с неразрабатываемым участком // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 1. С. 126–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-126-134
- [19] Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations // International J. of Forest Engineering, 2022, no. 33(2), pp. 108–118. DOI: 10.1080/14942119.2022.204472
- [20] Jones M.-F., Arp P. Soil trafficability forecasting // Open J. of Forestry, 2019, no. 9, pp. 296–322.  
<https://doi.org/10.4236/ojf.2019.94017>
- [21] Schönauer M., Hoffmann S., Maack J., Jansen M., Jaeger D. Comparison of selected terramechanical test procedures and cartographic indices to predict rutting caused by machine traffic during a cut-to-length thinning operation // Forests, 2021, no. 12 (2), p. 113. <https://doi.org/10.3390/f12020113>
- [22] Mohtashami S., Eliasson L., Jansson G., Sonesson J. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden // Silva Fennica, 2017, v. 51, no. 5, article id. 2018, 14 p. <https://doi.org/10.14214/sf.2018>
- [23] Ласточкин Д.М., Москалева С.А., Ларина А.В., Мучкаева Г.М. Моделирование опорной поверхности лесосечных машин // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2013. № 85(01). С. 1–13.
- [24] Добрынин Ю.А., Поликарпов А.О. К вопросу оценки возмущений на ходовую систему транспортных машин в процессе их движения в лесных условиях // Сборник статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2022 года. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2023. С. 28–32.
- [25] Симанович В.А., Пищов М.Н., Смяян А.И. Эксплуатационная оценка работы колесных лесных агрегатных машин // Труды БГТУ. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2008. № 2. С. 92–95.
- [26] Гойденко А.А., Алябьев А.Ф. Об определении статистических характеристик микропрофилей вырубков // ИзВУЗ Лесной журнал, 1989. № 2. С. 119–120.
- [27] Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск, 2018. 40 с.
- [28] Протас П.А., Завойских Г.И. Работоспособность трелевочных волоков на грунтах повышенного увлажнения // Труды БГТУ. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2005. № 13. С. 28–30.
- [29] Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.

- [30] Добрынин Ю.А., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л., Спиридонов С.В., Кузин И.С. Преобразование законов распределения исследуемых параметров вертикальной динамики лесохозяйственного трактора колесной формулой 4x4 // Сб. статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2021 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2022. С. 408–415.
- [31] Борисевич В.Б. Научные основы моделирования и управления технологическими машинами на грунтах со слабой несущей способностью: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 2006. 42 с.
- [32] Цыгарова М. В. Повышение эффективности освоения лесосек с переувлажненными грунтами путем обоснования рациональной технологии: в условиях Республики Коми: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 1998. 21 с.

## Сведения об авторе

**Пискунов Максим Анатольевич** — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», piskunov\_mp@list.ru

Поступила в редакцию 16.02.2025.

Одобрено после рецензирования 30.10.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

# EFFECT OF VEHICLE TRAFFIC ON STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SKIDDING TRAIL MICROPROFILE IN CONDITIONS OF ALTERING SOIL PROPERTIES

**M.A. Piskunov**

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

piskunov\_mp@list.ru

The results of experiments on measuring the height of a micro-profile of a skidding trail laid through areas differing in the bearing capacity of soils are presented. Data is presented on how the micro-profile of the skidding trail changes and how the formation of a rutting is manifested in areas with different bearing capacities in the statistical processing of the profile height coordinates as the number of harvester and forwarder passes increases. The statistical samples made up of the micro-profile heights measured along the skidding trail at points within one meter of each other are analyzed. It is shown that as the number of logging passes increases, the variance of each subsequent sample increases. But with each new series of passes, the intensity of the increase of the variance decreases, while the samples do not follow a normal distribution. It is indicated that the exclusion of the height values of the micro-profile measured at the section passing through the zone of soils with low bearing capacity changes the statistical characteristics of the samples. It was found that the sequence of heights values of the micro-profile obtained only in areas with high load-bearing capacity of soil follows a normal distribution, regardless of the number of logging machines passes, and the variance of data is more related to the heterogeneity of the logging residues covering on the trail rather than the rutting. It is recommended that skidding trails passing through areas with different soil properties should be considered in a separate classification category of transport trails when statistical modeling of the micro-profile of the skidding trail is carried out. In models of movement of logging machines along such trails, it is recommended to take into account that the statistical characteristics of the micro-profile in different parts of the trail differ and change after each transit of a machine.

**Keywords:** skidding trail, rut depth, longitudinal microprofile, forest soil, forwarder

**Suggested citation:** Piskunov M.A. *Issledovanie vliyaniya proezdov tekhniki na statisticheskie kharakteristiki mikroprofilya voloka v usloviyakh izmenyayushchikhsya svoystv pochvogruntov* [Effect of vehicle traffic on statistical characteristics of skidding trail microprofile in conditions of altering soil properties]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 140–152. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-140-152

## References

- [1] Grigorev I.V., Tsygarova M.V., Zhukova A.I., Lepilin D.V., Esin G.Yu. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii vzaimodeystviya trelevochnoy sistemy s volokom* [Design of experiment in the research of interaction of logging system with logway]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management»], 2011, no. 2(12), pp. 47–54.
- [2] Zhukov A.V. *Teoreticheskie osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin* [Theoretical foundations of choosing technical parameters and improving the operational properties of special logging machines]. Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.06.02. Leningrad, 1978, 36 p.
- [3] Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. *Teoreticheskie issledovaniya proizvoditel'nosti forvarderov pri ogranicheniyakh vozdeystviya na pochvogrunty* [Theoretical studies of forwarder productivity with limited impact on soils]. Russian Forestry J., 2021, no. 3, pp. 101–116 DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
- [4] Zhukov A.V., Loy V.N. *Otsenka vliyaniya glubiny kolei na silu soprotivleniya kacheniyu kolesnoy trelevochnoy mashiny* [Assessment of the effect of rut depth on the rolling resistance of a wheeled skidding machine]. Lesa Evropeyskogo regiona — ustoychivoe upravlenie i razvitiye: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Forests of the European region — sustainable management and development: materials of the international scientific and practical conference]. Part 2, Minsk, December 4–6, 2002, Minsk: BSTU, 2002, pp. 198–201.
- [5] Loy V.N. *Otsenka sily soprotivleniya kacheniyu kolesnoy trelevochnoy mashiny s uchetom deformatsii lesnykh pochvogrunтов* [Evaluation of the rolling resistance force of a wheeled skidding machine, taking into account the deformation of forest soils]. Trudy BGU. Lesnaya i derevoobrabatvayushchaya promyshlennost' [Proceedings of BSTU. Forestry and Woodworking Industry], 2002, no. 2, pp. 44–47.
- [6] Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. *Obrazovanie koleynosti pri prokhode lesozagotovitel'noy tekhniki v el'nikakh na dvuchlennykh porodakh* [Rut formation after the passage of logging machinery in spruce forests on binomial soils]. Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy], 2021, no. 237, pp. 168–182. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.168-182>
- [7] Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest, 2022, no. 15, pp 476–483. DOI: 10.3832/ifer4138-015
- [8] Fjeld D., Østby-Berntsen Ø. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development — a Norwegian field study. Int. J. For. Eng., 2020, no. 31(3), pp. 192–196. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>
- [9] Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Mola-Yudego B., Prinz R., Väättäin K., Talbot B., Routa J. The effect of bogie track and forwarder design on rut formation in a peatland. Int. J. For. Eng., 2021, no. 32(sup1), pp. 12–19. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1935167>
- [10] Bumber Z., Đuka A., Popović M., Poršinsky T. Soil characteristics in oak lowland stand — a case study of a 6-wheeled forwarder's impact on forest soil. Croat. J. For. Eng., 2024, no. 45(1), pp. 85–95. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2362>
- [11] Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bavykina E.G., Vikulin I.A., Bryukhovetskiy A.N., Boykov P.A. *Optimal'noe razmeshchenie lesotransportnoy seti na modeli mestnosti* [Optimal placement of the forest transportation network on the terrain model]. Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: mater. nats. nauch.-prakt. konf. [Theory and practice of innovative technologies in agriculture: mater. national scientific and practical conference]. Part 1, Voronezh, April 19–21, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 99–120.
- [12] Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic). Eurasian Soil Sci., 2022, v. 55, no. 11, pp. 1633–1646. <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>
- [13] Bolshakov B.M. *Snizhenie otritsatel'nykh posledstviy ot vozdeystviya trelevochnykh sistem na lesnyuyu pochvu* [Reducing the negative effects of skidding systems on forest soil]. Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. St. Petersburg, 1998. 61 p.
- [14] Borovlev Yu.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.V., Sergeev A.S., Yarovenko A.A. *Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Parameters control of roadbed soil compaction process on truck haul roads]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 139–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155
- [15] Ilintsev A.S., Cherkasov N.S. *Analiz pochvennogo pokrova sploshnykh vyrubok s pomoshch'yu bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Analysis of soil cover of clearcuts using unmanned aerial vehicle]. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2024, v. 21, no. 4, pp. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-223-234
- [16] Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. *Modelirovanie vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh* [Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes]. Russian Forestry J., 2021, no. 6, pp. 121–134. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-121-134
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [Efficiency of technological operations during selective logging]. Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa [Actual problems of forest complex development], Vologda, December 1–2, 2015. Vologda: Vologda State University, 2016, pp. 32–37.
- [18] Makarenko A.V. *Proektirovanie skhem trelevochnykh volokov na lesoseke s nerazrabatyvaемым uchastkom* [Design of skidding trails at untapped cutting area]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 126–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-126-134

- [19] Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *Int. J. For. Eng.*, 2022, no. 33(2), pp. 108–118. DOI: 10.1080/14942119.2022.204472
- [20] Jones M.-F., Arp P. Soil trafficability forecasting. *OJF*, 2019, no. 9, pp. 296–322. <https://doi.org/10.4236/ojf.2019.94017>
- [21] Schönauer M., Hoffmann S., Maack J., Jansen M., Jaeger D. Comparison of selected terramechanical test procedures and cartographic indices to predict rutting caused by machine traffic during a cut-to-length thinning operation. *Forests*, 2021, no. 12 (2), p. 113. <https://doi.org/10.3390/f12020113>
- [22] Mohtashami S., Eliasson L., Jansson G., Sonesson J. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden // *Silva Fenn.*, 2017, v. 51, no. 5, article id 2018, 14 p. <https://doi.org/10.14214/sf.2018>
- [23] Lastochkin D.M., Moskaleva S.A., Larina A.V., Muchkaeva G.M. *Modelirovanie opornoy poverkhnosti lesosechnykh mashin* [Modeling of the support surface of logging machines]. *Nauchnyy zhurnal KUBGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 85(01), pp. 1–13.
- [24] Dobrynin Yu.A., Polikarpov A.O. *K voprosu otsenki vozmushcheniy na khodovuyu sistemu transportnykh mashin v protsesse ikh dvizheniya v lesnykh usloviyakh* [On the issue of assessing disturbances on the chassis of transport vehicles during their movement in forest conditions]. *Sbornik statey po materialam nauch.-tekhn. konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2022 goda* [Collection of articles based on scientific and technical materials. conferences of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of scientific research works of 2022]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 28–32.
- [25] Simanovich V.A., Pishchov M.N., Smeyan A.I. *Ekspluatatsionnaya otsenka raboty kolesnykh lesnykh agregatnykh mashin* [Operational assessment of the operation of wheeled forest aggregate machines]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series 2. Forestry and woodworking industry, 2008, no. 2, pp. 92–95.
- [26] Goydenko A.A., Alyabev A.F. *Ob opredelenii statisticheskikh kharakteristik mikroprofiley vyrubok* [The determination of statistical characteristics of microprofiles of cutting areas]. *Russian Forestry J.*, 1989, no. 2, pp. 119–120.
- [27] Khakhina A.M. *Metody prognozirovaniya i povysheniya prokhodimosti kolesnykh lesnykh mashin* [Methods of forecasting and increasing the cross-country ability of wheeled forest vehicles]. *Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Arkhangelsk*, 2018. 40 p.
- [28] Protas P.A., Zavoytskikh G.I. *Rabotosposobnost' trelevochnykh volokov na gruntakh povyshennogo uvlazhneniya* [The operability of skidding trails on soils with increased moisture]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Series 2. Forestry and woodworking industry, 2005, no. 13, pp. 28–30.
- [29] Silaev A. *Spektralnaya teoriya podressorivaniya transportnykh mashin* [Spectral theory of springing of transport vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 192 p.
- [30] Dobrynin Yu.A., Krivonogova A.S., Pushkov Yu.L., Spiridonov S.V., Kuzin I.S. *Preobrazovanie zakonov raspredeleniya issleduemykh parametrov vertikal'noy dinamiki lesokhozyaystvennogo traktora kolesnoy formuloy 4x4* [Transformation of the distribution laws of the studied parameters of the vertical dynamics of a 4x4 forestry tractor]. *Sbornik statey po materialam nauch.-tekhn. konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issled. rabot 2021 goda* [Collection of articles based on scientific and technical materials. conferences of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of scientific research works of 2021]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2022, pp. 408–415.
- [31] Borisevich V.B. *Nauchnye osnovy modelirovaniya i upravleniya tekhnologicheskimi mashinami na gruntakh so slaboy nesushchey sposobnost'yu* [Scientific foundations of modeling and control of technological machines on soils with weak bearing capacity]. *Abstract Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.05.03. Moscow*, 2006. 42 p.
- [32] Tsygarova M.V. *Povyshenie effektivnosti osvoeniya lesosek s pereuvlazhennymi gruntami putem obosnovaniya ratsional'noy tekhnologii: v usloviyakh Respubliki Komi* [Improving the efficiency of the development of logging areas with waterlogged soils by substantiating rational technology: in the conditions of the Komi Republic]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. St. Petersburg*, 1998. 21 p.

## Author's information

**Piskunov Maksim Anatol'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Petrozavodsk State University, [piskunov\\_mp@list.ru](mailto:piskunov_mp@list.ru)

Received 16.02.2025.

Approved after review 30.10.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.