

Сравнительный анализ воздействия на почвогрунты лесных машин с различными движителями на склонах

И.В. Григорьев^{1а}, А.С. Дмитриев^{2б}, В.А. Каляшов^{2с}, И.С. Должиков^{2д},
А.А. Кривошеев^{3е}, А.С. Швецов^{4ф}, О.И. Григорьева^{5г}

¹ Арктический государственный агротехнологический университет,
Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

³ Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми

⁴ Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Маршала Жукова, 1, Сызрань, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^а silver73@inbox.ru, ^б dmitriev.nauka@mail.ru, ^с vit832@yandex.ru, ^д idolzhikov222@mail.ru,

^е ugtukrivoshchev@mail.ru, ^ф Kapitan2304@yandex.ru, ^г grigoreva_o@list.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^ф <https://orcid.org/0009-0003-3724-7082>,

^г <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Статья поступила 09.01.2024, принята 24.01.2024

В настоящее время в лесозаготовительном производстве Российской Федерации используются различные системы машин, от мощных специализированных (харвестеры, форвардеры) до машин среднего и малого класса тяги, часто на базе сельскохозяйственных или промышленных тракторов общего назначения. Эти машины могут оснащаться колесными, гусеничными и полугусеничными движителями, что делает актуальным сравнительный анализ их воздействия на лесные почвогрунты. В статье приведены результаты исследования воздействия движителей лесных машин на почвогрунты лесосек. В ходе исследования были измерены и проанализированы различные показатели, такие как угол наклона, пористость почвы и плотность частиц, а также проведено сравнение разных типов движителей — колесного, полугусеничного и гусеничного. Результаты показали, что колесная техника оказывает существенное влияние на данные показатели. Прохождение гусеничной техники имеет меньшее влияние на почвогрунты сравнительно с колесным и полугусеничным типами лесных машин. Эти результаты указывают на потенциальное нарушение структуры почвы и изменение ее физико-химических свойств в результате использования лесных машин. Результаты исследования имеют важное значение для понимания воздействия техники на экологическое состояние лесных экосистем и для разработки эффективных стратегий устойчивого лесопользования. Дальнейшие исследования в этой области позволят уточнить эти результаты и определить оптимальные методы использования лесных машин с минимальным воздействием на почвогрунты.

Ключевые слова: лесные почвогрунты; лесозаготовка; лесные машины; движители лесных машин; уплотнение почвогрунта; деформация почвогрунта.

Comparative analysis of the impact of forest machines with various propellers on slope soils

I.V. Grigoriev^{1а}, A.S. Dmitriev^{2б}, V.A. Kalyshov^{2с}, I.S. Dolzhikov^{2д},
A.A. Krivosheev^{3е}, A.S. Shvetsov^{4ф}, O.I. Grigorieva^{5г}

¹ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Sergelyakhskoye Shosse, Bld. 3, Yakutsk, Republic of Sakha

² St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.,
St. Petersburg, Russia

³ Ukhta State Technical University; 13, Pervomaiskaya St., Ukhta, Republic of Коми

⁴ Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin; 1, Marshal Zhukov St., Syzran, Russia

⁵ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov; 5, InstitutskyPer., St. Petersburg, Russia

^а silver73@inbox.ru, ^б dmitriev.nauka@mail.ru, ^с vit832@yandex.ru, ^д idolzhikov222@mail.ru,

^е ugtukrivoshchev@mail.ru, ^ф Kapitan2304@yandex.ru, ^г grigoreva_o@list.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, ^ф <https://orcid.org/0009-0003-3724-7082>,

^г <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Received 09.01.2024, accepted 24.01.2024

Currently, a wide variety of machine systems are used in the logging industry of the Russian Federation – from powerful specialized (harvesters, forwarders), to medium- and small-class traction machines, often based on agricultural or industrial general-purpose tractors. These machines can be equipped with wheeled, tracked, and semi-tracked thrusters, which makes a comparative analysis of their impact on forest soils relevant. The article presents the results of a study of the impact of forest machinery movers on the soils of logging areas. During the study, various indicators were measured and analyzed, such as the angle of inclination, soil porosity and particle density, as well as a comparison of different types of propulsion: wheeled, semi-tracked and tracked ones. The results show that the wheeled vehicles have a significant impact on these indicators. The passage of tracked vehicles has less impact on soils, compared with wheeled and semi-tracked types of forest vehicles. These results indicate a potential disturbance of the soil structure and a change in its physico-chemical properties as a result of the use of forest machinery. The results of the study are important for understanding the impact of technology on the ecological state of forest ecosystems and for developing effective strategies for sustainable forest management. Further research in this area will make it possible to refine these results and determine the optimal methods of using forest machines with minimal impact on soils.

Keywords: forest soils; logging; forest machines; propellers of forest machines; soil compaction; soil deformation.

Введение. Лесозаготовительные работы — это неотъемлемый компонент производственной системы лесного комплекса. Крайне важно, чтобы лесосечные работы проводились эффективно с экономической, технологической и экологической точек зрения [1]. В этой связи ключевые аспекты лесозаготовительного производства — выбор и использование оптимальных систем машин для выполнения лесосечных работ [2] — определяют фундаментальные решения при выборе лесных машин относительно типа движителя, который оказывает прямое влияние на эффективность и производительность работы в лесу [3].

Среди различных факторов, влияющих на производительность лесозаготовительной техники, уклон местности играет решающую роль и существенно влияет на выбор и эффективность такой техники при лесозаготовительных работах [4], поскольку является ключевым фактором, определяющим как скорость, так и устойчивость задействованных машин. Использование трелевочных тракторов на склонах имеет особое значение в лесосечных работах [5].

Лесосечные работы оказывают значительное воздействие на почву, особенно с точки зрения уплотнения и колееобразования [6]. Уплотнение происходит, когда механические силы, воздействующие на почву, вызывают сжатие частиц почвы, уменьшая поровое пространство и приводя к увеличению объемной плотности почвы. Этот процесс более выражен при высокой влажности почвы, так как повторные проходы машин могут вызвать деформацию почвы [7].

Взаимодействие лесных машин с поверхностью почвогрунта происходит, когда машины перемещаются по лесосеке. В современной практике лесозаготовок широко используются машины с колесными, гусеничными и, значительно реже, полугусеничными движителями. Трелевочные тракторы, такие как гусеничные и полугусеничные модели, предоставляют большие возможности для работы на склонах [8; 9].

Машины с колесными движителями обладают высокой маневренностью и скоростью передвижения, что делает их оптимальным выбором для выполнения операций на ровных или слабо наклонных участках [10]. Гусеничные машины, с другой стороны, обеспечивают большую проходимость в сложных условиях, таких как гористая местность или слабонесущий почвогрунт. Полугусеничные машины сочетают преимущества обоих типов, обеспечивая как маневренность, так и проходимость [11].

Колесные трелевочные тракторы представляют собой один из наиболее распространенных типов машин, используемых в лесозаготовках [12–14].

Важным аспектом использования колесных трелевочных тракторов является их способность к маневрированию в ограниченном пространстве [15]. Колесные трелевочные тракторы также обладают значительной грузоподъемностью и могут перевозить большие объемы заготовленной древесины. Это сокращает количество времени и труда, затрачиваемых на трелевку, и увеличивает производительность лесозаготовительных операций [16]. Гусеничные и полугусеничные тракторы обладают лучшей тягой и сцеплением с поверхностью, что позволяет им эффективно передвигаться по склонам и преодолевать преграды. Это особенно важно при работе на крутых и неровных участках, где колесные тракторы могут испытывать затруднения [17].

Со временем наметилась тенденция к увеличению веса и производительности машин. Лесные машины оказывают давление на поверхность почвогрунта, при этом на степень воздействия колесных машин в первую очередь влияют свойства шин, такие как диаметр, ширина, жесткость и уровень накачивания, для гусеничных — ширина гусеницы [18; 19]. На уплотнение почвогрунта, характеризующееся разрушением почвенных пор и поверхностных агрегатов, влияют такие факторы, как механический состав почвы, уровень влажности, количество проходов машин [20; 21].

Исследования показывают, что уплотнение почвы является наиболее значительным во время первых проходов лесных машин, при этом большая часть уплотнения происходит в течение первых трех проходов. Последующие проходы обычно оказывают минимальное дополнительное влияние. Вместе с тем, взаимосвязь между уклоном (как продольным, так и поперечным) волока и направлением движения машин (в гору или под гору) в изменении воздействия лесных машин на почву еще полностью не изучена. Можно предположить, что на крутых склонах машины могут проскальзывать, что приводит к увеличению динамики колееобразования за счет касательных сил, реализуемых движителем.

Для многих лесообеспеченных субъектов Российской Федерации, прежде всего Сибири и Дальнего Востока, проблематика эффективного и средоохраняющего освоения спелых и перестойных лесных насаждений на крутых и очень крутых склонах является чрезвычайно актуальной. В ряде регионов, расположенных на веч-

ной мерзлоте, например, в Республике Саха (Якутия), эта проблематика усугубляется очень специфическими свойствами почвогрунтов криолитозоны в теплый период года, прежде всего это связано со специфическим их строением и протаиванием слоя сезонной мерзлоты.

В большинстве крупных и средних лесозаготовительных предприятий Российской Федерации в настоящее время используются тяжелые энергонасыщенные импортные колесные лесные машины (рис. 1). В сложных условиях эксплуатации, таких как слабонесущие почвогрунты, глубокий снежный покров, значительный уклон местности, их обычно оснащают комплектами колесных гусениц (моногоусеницами), которые устанавливаются на тандемные колесные пары.

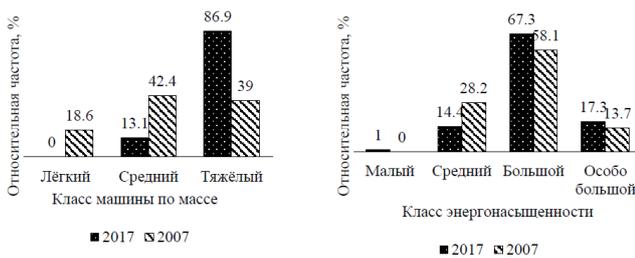


Рис. 1. Распределение трелевочных тракторов по классам массы и энергонасыщенности на лесозаготовительных предприятиях Российской Федерации

В подавляющем большинстве мелких и малообъемных лесозаготовительных предприятий Российской Федерации используются или устаревшие гусеничные лесные машины, или машины на базе колесных сельскохозяйственных тракторов с колесной формулой 4х4, которые при неблагоприятных условиях эксплуатации могут переоснащаться под полугусеничный ход, когда на задние ведущие колеса при помощи дополнительных ведомых колес или звездочек устанавливаются моногоусеницы (рис. 2).



Рис. 2. Форвардер на базе трактора на полугусеничном ходу

Анализ использования каждого типа машин на лесозаготовках поможет определить их влияние на лес в различных условиях и задачах. Это позволит лесозаготовительным предприятиям и специалистам принимать обоснованные решения при выборе наиболее подходящего оборудования для конкретных природно-производственных условий. Получив лучшее представление о возможностях и ограничениях лесных машин на пересеченной местности, технологи могут принимать обоснованные решения относительно наиболее подходящих вариантов освоения лесосек.

Материалы и методы исследования. Исследование проводили на территории юга Республики Саха (Якутия) в сентябре 2022 г. Средняя суточная температура 6–9 °С. Почвогрунты классифицируют как дерново-глеевые, со средней влажностью 30–82 % и содержанием органического вещества 3–19 %. Примерная площадь испытываемой территории 1 га. Максимальный уклон рельефа 20 %. Преобладающим видом древесины является лиственница Каяндера (*L. cajanderi*) со следующими характеристиками: средняя высота — 23,4 м, средний диаметр на высоте 1,3 м — 46 см.

Результаты исследования. Территорию разделили на экспериментальные участки в зависимости от уклона рельефа, таким образом были сформированы 4 типа участков: а) 0–5 % включительно; б) 5–10 %; в) 10–15 % и г) 15–20 %. Среднее расстояние трелевки 250 м.

Образцы были отобраны из колеи после 3-х проходов лесной машины. Пробы диаметром 50 мм отбирали после удаления органического слоя на глубине 50–200 мм. В качестве значений контроля использовали пробы, полученные из волоков до начала проведения работ.

На месте измеряли сопротивление проникновения в почву (R_p) с использованием ручного пенетromетра.

Образцы перевозили в лабораторию в пластиковых пакетах, где сразу взвешивали и высушивали 24 ч при 105 °С. Измеряли плотность частиц (D_p) и рассчитывали по формуле [22]:

$$D_p = \frac{D_w \cdot W_s}{W_s - W_{SWP} - W_{WP}},$$

где D_w — плотность воды, г/см³; W_s — сухой вес образца почвы, г; W_{SWP} — вес пикнометра с почвой и водой, г; W_{WP} — вес пикнометра с водой, г.

Также измеряли объемную плотность почвы (D_s), рассчитывая по формуле [23]:

$$D_s = \frac{W_s}{V_s},$$

где V_s — объем почвы, г/см³.

Полученные значения были использованы для расчета пористости почвы [23]:

$$P_s = \frac{(D_p - D_s)}{D_p} \cdot 100\%.$$

Информация по используемым в испытаниях машинам предоставлена в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики

Марка	PONSSE Buffalo K100	МТЗ-82	ТТ-4М 01
Тип	Колесный	Полугусеничный	Гусеничный
Вес, кг	18 600	3 270	12 600
Мощность двигателя, кВт	210	59	98
Максимальная скорость, км/ч	20	35	20
Габариты, мм:			
– длина	9 610	3 930	5 927
– ширина	3 085	1 970	2 700
– высота	3 860	1 665	2 957

Отбор проб проводили в трех точках, анализируя каждую из них отдельно. Статистический анализ прово-

дили с использованием одностороннего теста ANOVA на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Графические данные получали с помощью *Excel* (2013).

До проведения эксперимента значение R_p составляло 1,319–1,474 МПа. Как видно на рис. 3, с увеличением угла уклона местности значение возрастает на 4–140 кПа, или 3,2–10,5 %, зависимо от глубины изъятия пробы. При этом после прохождения колесной техники R_p возрастает на 23–263 кПа, полугусеничной — на 51–259 кПа, гусеничной — на 3–172 кПа при увеличении уклона рельефа. Максимальное значение R_p зафиксировано для глубины 150–200 мм после прохождения колесной машины — 1,637 МПа.

На участках с уклоном 0–5 %, наблюдается общая тенденция увеличения R_p с увеличением глубины измерений и различия между типами машин. Например, на всех глубинах измерений 50–200 мм гусеничные машины имеют более низкое влияние на сопротивление проникновения (1,417–1,427 МПа), чем колесные (1,439–1,485 МПа) и полугусеничные машины (1,432–1,465 МПа). На участках с наклоном 5–10 % R_p также увеличивается с увеличением глубины измерений. Здесь гусеничные машины показывают более низкое сопротивление проникновения (1,436–1,471 МПа) по сравнению с колесными (1,480–1,529 МПа) и полугусеничными (1,465–1,474 МПа). На участках с наклоном 10–15 и 15–20 % наблюдается схожая тенденция. Сопротивление проникновению увеличивается с увеличением глубины измерений. Гусеничные машины на этих участках также демонстрируют более низкое сопротивление проникновению (1,440–1,531 МПа на участках 10–15 % и 1,520–1,637 МПа на участках 15–20 %) по сравнению с колесными (1,498–1,541 МПа и 1,647–1,725 МПа соответственно) и полугусеничными машинами (1,522–1,598 МПа и 1,578–1,679 МПа соответственно).



Рис. 3. Сопротивление проникновению в почву

Анализируя значения объемной плотности почвогрунта на разных участках наклона и глубинах отбора пробы, можно выделить следующие наблюдения. На участке с углом наклона 0–5 % значения объемной плотности варьируются от 1,03 до 1,08 г/см³ при глубине отбора пробы 50–100 мм. При глубине отбора пробы 100–150 мм значения объемной плотности увеличиваются и варьируются от 1,05 до 1,19 г/см³, а при глубине отбора пробы 150–200 мм они продолжают расти и варьируются от 1,12 до 1,26 г/см³. Проход гусеничных машин чаще приводит к более низким значениям объемной плотности почвы по сравнению с колесными и полугусеничными машинами.

На участке с углом уклона 5–10 % наблюдается аналогичная тенденция к увеличению объемной плотности почвы с увеличением глубины отбора пробы. Независимо от глубины отбора пробы, использование колесных машин сопровождается более высокими значениями объемной плотности почвогрунта по сравнению с колесными и полугусеничными машинами (рис. 4). На участках с углом наклона 10–15 и 15–20 % также наблюдается увеличение объемной плотности почвогрунта с увеличением глубины отбора пробы. После прохождения гусеничных машин значения объемной плотности почвогрунта наименьшие по сравнению с колесными и полугусеничными машинами на большинстве участков наклона и глубин отбора пробы. Использование гусеничных машин на этих участках также демонстрирует минимальную объемную плотность (1,08–1,21 г/см³ на участках 5–10 %, 1,07–1,22 г/см³ на участках 10–15 % и 1,06–1,20 г/см³ на участках 15–20 %) по сравнению с колесными (1,09–1,28 г/см³, 1,08–1,32 г/см³ и 1,09–1,26 г/см³ соответственно) и полугусеничными машинами (1,08–1,24 г/см³; 1,07–1,22 г/см³ и 1,07–1,21 г/см³ соответственно).

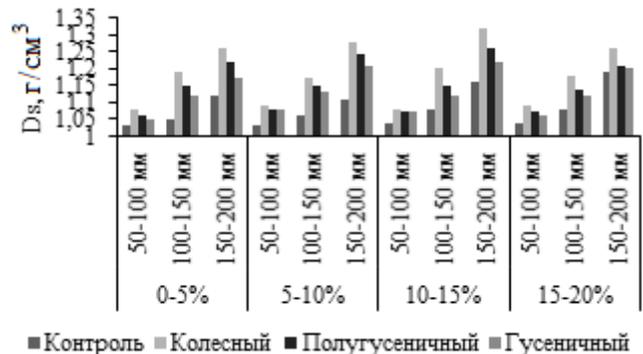


Рис. 4. Объемная плотность

На участке с углом наклона 0–5 % значения плотности частиц варьируются в диапазоне от 2,08 до 2,36 г/см³ при глубине отбора пробы 50–100 мм. При глубине отбора пробы 100–150 мм и 150–200 мм значения плотности частиц также различаются, но общая тенденция неоднозначна. На участке с углом наклона 5–10 % наблюдается некоторое увеличение значений плотности частиц почвы после прохождения техники, особенно при глубине отбора пробы 150–200 мм. Однако различия между типами техники не являются значительными. На участках с углом наклона 10–15 и 15–20 % наблюдается более явное влияние прохождения техники на плотность частиц почвогрунта. Значения плотности частиц после прохождения гусеничной техники обычно выше, особенно при глубине отбора пробы 150–200 мм.

На контрольном участке значения плотности частиц варьируются в диапазоне от 2,08 до 2,36 г/см³ (рис. 5). При глубине отбора пробы 100–150 и 150–200 мм значения плотности частиц также различаются, но общая тенденция неоднозначна. На участке с углом наклона 5–10 % наблюдается некоторое увеличение значений плотности частиц почвы после прохождения техники, особенно при глубине отбора пробы 150–200 мм. Однако различия между типами техники не являются значительными. На участках с углом наклона 10–15 и 15–

20 % наблюдается более явное влияние прохождения техники на плотность частиц почвогрунта. Значения плотности частиц после прохождения колесной техники обычно выше, особенно при глубине отбора пробы 150–200 мм.

При угле наклона рельефа 0–5 % и глубине отбора пробы 50–100 мм все типы машин показали повышенные значения плотности частиц почвогрунта, составляющие от 2,12 до 2,39 г/см³. Аналогичная тенденция наблюдалась и для глубины отбора пробы 100–150 мм, где значения плотности частиц варьировались от 2,13 до 2,29 г/см³. При глубине отбора пробы 150–200 мм значения плотности частиц колебались от 2,12 до 2,39 г/см³. При угле наклона рельефа 5–10 % и глубине отбора пробы 50–100 мм наблюдалось увеличение плотности частиц почвы для всех типов техники, где значения составляли от 2,10 до 2,21 г/см³. При глубине отбора пробы 100–150 мм значения плотности частиц варьировались от 2,13 до 2,27 г/см³, также указывая на повышение плотности. При глубине отбора пробы 150–200 мм значения плотности частиц колебались от 2,14 до 2,34 г/см³. Для углов наклона рельефа 10–15 и 15–20 % наблюдался аналогичный тренд. При глубине отбора пробы 50–100 мм все типы техники вызывали повышение плотности частиц, где значения составляли от 2,07 до 2,26 г/см³. При глубине отбора пробы 100–150 мм значения плотности частиц варьировались от 2,15 до 2,29 г/см³, указывая на повышенные значения. При глубине отбора пробы 150–200 мм значения плотности частиц колебались от 2,15 до 2,39 г/см³, также показывая увеличение плотности.

Как видно (табл. 2), при угле наклона рельефа 0–5 % и глубине отбора пробы 50–100 мм пористость почвогрунта составляет 56,4 % для контрольного участка. После прохождения колесной, полугусеничной и гусеничной техники значения пористости составляют 49,1; 50,1 и 51,6 % соответственно. При глу-

Таблица 2. Влияние техники на пористость почвы

Угол наклона, %	Глубина изъятия пробы, мм	Пористость, %			
		Контроль	Колесный	Полугусеничный	Гусеничный
0–5	50–100	56,4	49,1	50,1	51,6
	100–150	53,1	46,5	48,4	49,5
	150–200	46,2	43,2	45,6	47,5
5–10	50–100	55,9	48,2	50,4	51,2
	100–150	52,7	45,1	48,5	50,3
	150–200	48,2	42	43,5	48,2
10–15	50–100	56,1	47,8	50,3	52,6
	100–150	52,7	45,8	49,7	50,1
	150–200	46,8	38,6	42,3	43,6
15–20	50–100	55,8	48,4	53,2	53,6
	100–150	53,4	45,1	48,5	50,2
	150–200	47,5	40,5	43,5	49,8

Таким образом, все три типа машин — колесные, полугусеничные и гусеничные — влияют на почвогрунты, приводя к уплотнению, снижению пористости и повышению плотности частиц. Однако колесная техника оказывает наибольшее воздействие на эти по-

бине отбора пробы 100–150 мм при том же угле наклона рельефа 0–5 %, значения пористости почвы составляют 53,1 % для контрольного значения. После прохождения колесной, полугусеничной и гусеничной техники значения пористости составляют 46,5; 48,4 и 49,5 % соответственно.

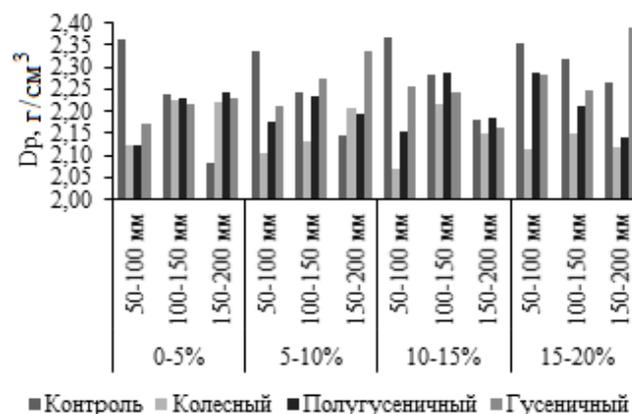


Рис. 5. Плотность частиц

Аналогичные тенденции наблюдаются и для глубины отбора пробы 150–200 мм при угле наклона рельефа 0–5 %. Пористость почвы составляет 46,2 % для контрольного значения. После воздействия колесной, полугусеничной и гусеничной техники значения пористости составляют 43,2; 45,6 и 47,5 % соответственно. При изменении угла наклона рельефа и глубины отбора пробы наблюдаются сходные тенденции. Общая тенденция заключается в том, что значения пористости почвогрунта снижаются после прохождения техники по сравнению с контрольным значением.

Расчетные данные пористости почвы предоставлены в табл. 2.

казатели, в то время как полугусеничная и гусеничная техника имеет более умеренное влияние. Результаты говорят о том, что гусеничные машины в целом имеют более низкое сопротивление проникновению в почву

сравнительно с колесными и полугусеничными машинами на всех участках наклона и глубинах измерений.

Плотность частиц почвы является важным показателем, который связан с ее лесорастительными свойствами. Высокая плотность частиц может указывать на компактность почвы, что ограничивает проникновение воды, воздуха и корней древесных растений. Измерение плотности частиц позволяет оценить структурные свойства почвы и определить ее способность к воздухо- и водопроницаемости, а также к развитию корневой системы растений [24]. Изучаемые характеристики также являются одними из показателей устойчивости почвенного покрова. Высокая плотность может приводить к эрозии, потере плодородия и снижению ее устойчивости к действию внешних факторов, таких как ветер и водные потоки [25]. Измерение плотности частиц помогает оценить состояние почвы с точки зрения ее устойчивости и принять меры по ее сохранению и восстановлению.

Полугусеничная техника, по сравнению с колесными машинами, может обладать лучшей проходимостью по сложной местности и слабонесущим почвогрунтам, а также по глубокому снежному покрову. Это позволяет уменьшить повреждение почвы и минимизировать компактацию, особенно при выполнении работ на мокрой или неустойчивой почве. Гусеницы полугусеничной техники распределяют вес и давление более равномерно по поверхности почвогрунта, в отличие от колесной техники, которая может создавать более точечные нагрузки и, соответственно, большее давление. Одновременно с этим улучшается маневренность техники сравнительно с гусеничной [26].

М. Strandgard и др. [26] изучали влияние угла наклона на производительность лесозаготовительной техники. Они проанализировали работу техники на двух классах склонов рельефа: 12–19 ° и 20–26 °. Было показано, что повышение угла наклона негативно влияет на процесс, в результате чего увеличивается время процесса. При этом увеличивается время контакта движителя и почвы, что может сопровождаться снижением плодородности почвы в результате выноса орга-

нической материи и уплотнения [26]. В данном исследовании проанализированы три основных типа лесных машин по типу движителя. Установлено, что с увеличением уклона рельефа местности негативное влияние на почвогрунт возрастает.

В свою очередь, авторы работы [27] проанализировали влияние трелевочной техники на склонах 25 %. Авторы показывают, что объемная плотность почвы в точках соприкосновения колесного движителя возрастает на 40 %, тогда как в данном исследовании максимальное значение составляет 15,3 %.

Выводы. Тип техники оказывает значительное влияние на показатели плотности частиц почвы. При работе на уклонах 0–5 и 5–10 %, колесная техника демонстрирует лучшие результаты по плотности частиц, в то время как полугусеничная и гусеничная техника имеет схожие значения. При работе на уклонах 10–15 и 15–20 % гусеничная техника показывает наилучшие показатели, в то время как колесная и полугусеничная техника имеет примерно схожие показатели, хотя показатели последней стремятся к аналогичным для гусеничной.

Угол наклона также оказывает влияние на показатели плотности частиц. При уклоне 0–5 и 5–10 % плотность частиц уменьшается с увеличением глубины отбора проб во всех типах техники. При наклоне 10–15 и 15–20 % плотность частиц имеет более разнообразные значения в зависимости от типа техники и глубины отбора проб.

Таким образом, тип техники и угол наклона местности имеют существенное влияние на показатели плотности частиц в почве. Эти результаты представляют важную информацию для принятия решений в лесозаготовительном производстве и лесном хозяйстве, а также могут служить основой для разработки новых систем машин и технологий разработки лесосек.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Литература

1. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 323-326.
2. Куницкая О.А., Никитина Е.И., Николаева Ф.В. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий (26 февр. 2021 г.). Якутск, 2021. С. 308-313.
3. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // International Journal of Environmental Studies. 2023. V. 80, № 4. P. 1055-1064.
4. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев В., Куницкая О.А., Дмитриев А.С., Григорьева О.И. Геотехническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах, оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным движителем // Resources and Technology. 2023. V. 20, № 3. P. 15-31.
5. Куницкая О.А., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В., Новиков М.С., Каляшов В.А. Промежуточные итоги проекта «теоретическое и экспериментальное обоснование систем машин для лесозаготовок и лесовосстановления на склонах в условиях криолитозоны» // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (2 мая 2023 г.). Петрозаводск, 2023. С. 108-110.
6. Дралалок М.В., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Григорьев И.В., Попиков П.И., Мануковский А.Ю. Теория и методы воздействия техники и технологии на лесную среду в процессе лесовыращивания и заготовки древесного сырья: моногр. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. лесотехнического ун-та им. Г.Ф. Морозова, 2022. 210 с.

7. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East // *Forest Science and Technology*. 2022. V. 18, № 4. P. 190-200.
8. Михайлова Л.М., Куницкая О.А., Мотовилов А.И. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъемных лесозаготовок и лесохозяйственных работ // *Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М.Е. Николаева (17 нояб. 2022 г.)*. Якутск, 2022. С. 735-742.
9. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного комплекса Республики Саха (Якутия) // *Лесной вестн. Forestry Bulletin*. 2022. Т. 26, № 5. С. 93-101.
10. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2022. № 1. С. 51-56.
11. Куницкая О.А. Тенденции развития лесопромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) // *Вестн. АГАТУ*. 2022. № 2 (6). С. 70-79.
12. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. V. 18, № 3. P. 95-102.
13. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. V. 19, № 2. P. 439-447.
14. Куницкая О.А., Давтян А.Б., Помигуев А.В. Транспортно-технологические комплексы для производства топливной щепы // *Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (15 апр. 2021 г.)*. Тюмень, 2021. С. 141-144.
15. Куницкая О.А., Просужих А.А., Каляшов В.А. Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // *Вестн. АГАТУ*. 2021. № 2 (2). С. 44-53.
16. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // *Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: сб. науч. ст. по материалам Всерос. студенческой науч.-практической конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума - 2020» (29-30 сент. 2020 г.) и Междунар. науч. онлайн летней школы - 2020 (6-20 июля 2020 г.)*. Якутск, 2020. С. 138-148.
17. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Герасимов С.В., Елизаров Ю.М. Исследование устойчивости краевой части массива, оттаявшего почвогрунта на склонах при воздействии лесных машин и трелевочных систем // *Системы Методы Технологии 2021*. № 2 (50). С. 70-75.
18. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничении воздействия на почвогрунты // *Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал*. 2021. № 3 (381). С. 101-116.
19. Куницкая О.А., Никитина Е.И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // *Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Рос. Федерации: сб. ст. III Междунар. науч.-технической конф. «Минские науч. чтения-2020» (3 дек. 2020 г.)*. Минск, 2021. С. 286-291.
20. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Mueller O., Hertz E., Chemshikova Y., Teterleva E., Knyazev A.V. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2019. V. 28, № 9. P. 179-197.
21. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhikh A., Kruchinin I., Shakirzyanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation // *Diagnostyka*. 2020. V. 21, № 2. P. 95-109.
22. Amoozegar A., Heitman J.L., Kranz C.N. Comparison of soil particle density determined by a gas pycnometer using helium, nitrogen, and air // *Soil Science Society of America Journal*. 2023. № 87 (1). P. 1-12.
23. Abdelbaki A.M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for US soils // *Ain Shams Engineering Journal*. 2018. № 9 (4). P. 1611-1619.
24. Zhou C., Huang W., Qiu S., Liu Z. A quantitative study on the amount of water-retaining agent based on adhesive-modified red bed weathered soil // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. № 80. P. 3139-3150.
25. Gonçalves J.L., Alvares C.A., Rocha J.H., Brandani C.B., Hakamada R. Eucalypt plantation management in regions with water stress // *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 2017. № 79 (3). P. 169-183.
26. Strandgard M., Alam M., Mitchell R. Impact of Slope on Productivity of a Self-levelling Processor // *Crojfe Journal of Forest Engineering*. 2014. № 35 (2). P. 193-200.
27. Marra E., Laschi A., Fabiano F., Foderi C., Neri F., Mastroloardo G., Marchi E. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods // *European Journal of Forest Research*. 2022. 141 (1). P. 1-16.

References

1. Rudov S.E., Kunickaya O.A. Theoretical studies of the ecological compatibility of wheeled forest vehicles and permafrost soils of the cryolithozone forests // *Transportnye i transportno-tehnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.)*. Tyumen', 2020. P. 323-326.
2. Kunickaya O.A., Nikitina E.I., Nikolaeva F.V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia // *Upravlenie zemel'nymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 255-letiyu Zemleustrojstvu YAKutii i Godu nauki i tekhnologij (26 fevr. 2021 g.)*. YAKutsk, 2021. P. 308-313.
3. Gerts E.F., Kunitskaya O.A., Runova E.M., Tikhonov E.A., Timokhov R.S., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfliev P.N. Forest preservation techniques in the Urals // *International Journal of Environmental Studies*. 2023. V. 80, № 4. P. 1055-1064.
4. Kalyashov V.A., SHapiro V.YA., Grigor'ev V., Kunickaya O.A., Dmitriev A.S., Grigor'eva O.I. Geotechnical substantiation of the operability of skidding drags and technological corridors on the slopes of thawing soils when working with wheeled and wheeled forest machines a semi-tracked engine // *Resources and Technology*. 2023. V. 20, № 3. P. 15-31.
5. Kunickaya O.A., Gur'ev A.YU., Novgorodov D.V., Novikov M.S., Kalyashov V.A. Interim results of the project "theoretical and experimental substantiation of machine systems for logging and reforestation on slopes in cryolithozone conditions" // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Devyatoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s*

- mezhdunar. uchastiem (2 maya 2023 g.). Petrozavodsk, 2023. P. 108-110.
6. Drapalyuk M.V., Hitrov E.G., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V., Popikov P.I., Manukovskij A.YU. Theory and methods of the impact of technology and technology on the forest environment in the process of reforestation and harvesting of wood raw materials: monogr. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo gos. lesotekhnicheskogo un-ta im. G.F. Morozova, 2022. 210 p.
 7. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East // *Forest Science and Technology*. 2022. V. 18, № 4. P. 190-200.
 8. Mihajlova L.M., Kunickaya O.A., Motovilov A.I. Prospects of machine systems based on small-scale mechanization for low-volume logging and forestry operations // *Strategiya i perspektivy razvitiya agrotekhnologij i lesnogo kompleksa YAkutii do 2050 goda: sb. nauch. st. po materialam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 100-letiyu obrazovaniya YAkutskoj ASSR i 85-letiyu Pervogo prezidenta RS(YA) M.E. Nikolaeva (17 noyab. 2022 g.)*. YAkutsk, 2022. P. 735-742.
 9. Mohirev A.P., Kunickaya O.A., Kalita G.A., Verner N.N., SHvecova V.V. Assessment of reliability of a harvesting harvester // *Lesnoj vestn. Forestry Bulletin*. 2022. V. 26, № 5. P. 93-101.
 10. Skobcov I.G., Kunickaya O.A. Requirements of standards for safety when working on forest machines // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2022. № 1. P. 51-56.
 11. Kunickaya O.A. Trends in the development of the timber industry complex of the Republic of Sakha (Yakutia) // *Vestnik ASAU (Scientific journal of Arctic State Agrotechnological University)*. 2022. № 2 (6). P. 70-79.
 12. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. V. 18, № 3. P. 95-102.
 13. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. V. 19, № 2. P. 439-447.
 14. Kunickaya O.A., Davtyan A.B., Pomiguyev A.V. Transport and technological complexes for the production of fuel chips // *Transportnye i transportno-tehnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (15 apr. 2021 g.)*. Tyumen', 2021. P. 141-144.
 15. Kunickaya O.A., Prosuzhkih A.A., Kalyashov V.A. Ecological and economic efficiency of forwarders' operation // *Vestnik ASAU (Scientific journal of Arctic State Agrotechnological University)*. 2021. № 2 (2). P. 44-53.
 16. Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. The project of organization of logging in the conditions of the Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes // *Sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike: sb. nauch. st. po materialam Vseros. studencheskoj nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem v ramkah «Severnogo foruma - 2020» (29-30 sent. 2020 g.) i Mezhdunar. nauch. onlajn letnej shkoly - 2020 (6-20 iyulya 2020 g.)*. YAkutsk, 2020. P. 138-148.
 17. Kalyashov V.A., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I., Gerasimov S.V., Elizarov YU.M. Study of stability of the marginal part of the thawed soil massif on slopes under the influence of forest machines and skidding systems // *Systems Methods Technologies*. 2021. № 2 (50). P. 70-75.
 18. Burmistrova O.N., Prosuzhkih A.A., Hitrov E.G., Kunickaya O.A., Luneva E.N. Theoretical studies of forwarder productivity under restrictions of impact on soils // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2021. № 3 (381). P. 101-116.
 19. Kunickaya O.A., Nikitina E.I. Ecological aspects of selective logging // *Ekologo-ekonomicheskie i tekhnologicheskie aspekty ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' i Ros. Federacii: sb. st. III Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. «Minskije nauch. chteniya-2020» (3 dek. 2020 g.)*. Minsk, 2021. P. 286-291.
 20. Rudov S., Grigorev I., Kunickaya O., Ivanov N., Kremleva L., Mueller O., Hertz E., Chemshikova Y., Teterleva E., Knyazev A.V. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2019. V. 28, № 9. P. 179-197.
 21. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhkih A., Kruchinin I., Shakirzyanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation // *Diagnostyka*. 2020. V. 21, № 2. P. 95-109.
 22. Amoozegar A., Heitman J.L., Kranz C.N. Comparison of soil particle density determined by a gas pycnometer using helium, nitrogen, and air // *Soil Science Society of America Journal*. 2023. № 87 (1). P. 1-12.
 23. Abdelbaki A.M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for US soils // *Ain Shams Engineering Journal*. 2018. № 9 (4). P. 1611-1619.
 24. Zhou C., Huang W., Qiu S., Liu Z. A quantitative study on the amount of water-retaining agent based on adhesive-modified red bed weathered soil // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. № 80. P. 3139-3150.
 25. Gonçalves J.L., Alvares C.A., Rocha J.H., Brandani C.B., Hakamada R. Eucalypt plantation management in regions with water stress // *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 2017. № 79 (3). P. 169-183.
 26. Strandgard M., Alam M., Mitchell R. Impact of Slope on Productivity of a Self-levelling Processor // *Crojfe Journal of Forest Engineering*. 2014. № 35 (2). P. 193-200.
 27. Marra E., Laschi A., Fabiano F., Foderi C., Neri F., Mastrolo-nardo G., Marchi E. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods // *European Journal of Forest Research*. 2022. 141 (1). P. 1-16.