

Исследование эффективности сборно-разборных дорожных конструкций для снижения негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты

А.М. Юдилевич^{1a}, Д.В. Новгородов^{2b}, В.А. Иванов^{1c}, О.А. Куницкая^{2d},
С.И. Ревяко^{3e}, В.П. Друзьянова^{4f}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, Республика Саха (Якутия)

^a kafedra388@mail.ru, ^b novgorodov_dulus@mail.ru, ^c ivanovva55@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru,

^e revyako77@mail.ru, ^f druzvar@mail.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-6975-5002>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8288-6030>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Статья поступила 14.03.2024, принята 12.04.2024

В Российской Федерации весьма остро стоит вопрос повышения экологической эффективности лесопользования, иначе говоря, снижения техногенной нагрузки на лесные экосистемы. И, прежде всего, снижения негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты. При этом речь идет не только о повреждениях почвогрунтов, возникающих при проведении рубок спелых и перестойных лесных насаждений, но и о повреждениях, наносимых при проведении различных лесохозяйственных мероприятий, включая лесовосстановительные работы, рубки ухода за лесом и т. д. В ряде случаев, например, в особо защитных участках леса лесосечные и лесохозяйственные работы не проводятся, но может возникнуть необходимость прохождения через них техники для того, чтобы добраться до находящихся за ними лесных участков, например, для борьбы с лесными пожарами и т. д. В таких случаях необходимо практически полностью исключать негативное воздействие движителей лесных машин на почвогрунты при перемещении машин и персонала. Хорошими защитными свойствами для решения рассматриваемой задачи обладают сборно-разборные дорожные конструкции. В статье представлены результаты сравнительных испытаний различных вариантов сборно-разборных дорожных конструкций с точки зрения их возможностей защитить почвогрунты от негативного воздействия движителей лесных машин. Результаты исследований коррелируются с ранее полученными результатами предшественников в других природно-производственных условиях.

Ключевые слова: сборно-разборные дорожные конструкции; воздействие на лесные почвогрунты; экологическая эффективность; лесопользование; уплотнение почвогрунтов.

Investigation of the effectiveness of collapsible road structures to reduce the negative impact of forest machinery propellers on soils

A.M. Yudilevich^{1a}, D.V. Novgorodov^{2b}, V.A. Ivanov^{1c}, O.A. Kunitskaya^{2d},
S.I. Revyako^{3e}, V.P. Druzyanova^{4f}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoye Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutiya)

³ Novochoerkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. Kortunov; 111, Pushkinskaya St., Novochoerkassk, Russia

⁴ Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov; 58, Belinsky St., Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutiya)

^a kafedra388@mail.ru, ^b novgorodov_dulus@mail.ru, ^c ivanovva55@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru,

^e revyako77@mail.ru, ^f druzvar@mail.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-6975-5002>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8288-6030>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Received 14.03.2024, accepted 12.04.2024

In the Russian Federation, the issue of increasing the ecological efficiency of forest management, in other words, reducing the anthropogenic burden on forest ecosystems, is very acute. And, above all, there is reducing the negative impact of forest machinery propellers on soils. At the same time, not only the damage to soils that occurs during logging of ripe and overgrown forest plantations is under consideration, but also the damage caused during various forestry activities, including reforestation, logging of forest care, etc is dis-

cussed. In some cases, for example, in specially protected areas of the forest, logging and forestry work are not carried out, but it may be necessary to pass equipment through them in order to get to the forest areas behind them, for example, to fight forest fires, etc. In such cases, it is necessary to practically completely eliminate the negative impact of forest machinery propulsion on soils when moving machines and personnel. Collapsible road structures have good protective properties for solving the problem under consideration. The article presents the results of comparative tests of various options for collapsible road structures from the point of view of their ability to protect soils from the negative impact of forestry machine engines. The research results correlate with previously obtained results of predecessors in other natural and industrial conditions.

Keywords: collapsible road structures; impact on forest soils; environmental efficiency; forest management; soil compaction.

Введение. Богатые природные растительные ресурсы играют жизненно важную роль в экономике России. Наряду с древесиной российские леса богаты другими видами лесных ресурсов с питательными и лечебными свойствами, что делает их ценным достоянием [1–3].

Леса служат экологической основой территорий России, и их сохранение имеет решающее значение для экологической безопасности страны и всей планеты. Благодаря разнообразию климатических, почвенных и географических условий, а также социально-экономическим различиям между регионами природно-производственные условия России обладают исключительным разнообразием [4; 5].

Помимо эстетической и рекреационной ценности леса выполняют множество важных функций. Они регулируют сток воды, поддерживают климат и богатое биологическое разнообразие, которое имеет решающее значение для экосистемы [6–8]. Кроме того, леса играют жизненно важную роль в смягчении последствий изменения климата, поскольку они поглощают углекислый газ и выделяют кислород в атмосферу. Но основной сферой, где используются лесные ресурсы, остается деревоперерабатывающая промышленность [9].

Лесные дороги, трелевочные волоки и технологические коридоры являются важнейшей инфраструктурой, обеспечивающей безопасный и эффективный доступ к лесам для различных видов лесозаготовительной и лесохозяйственной деятельности, включая заготовку древесины, ее транспортировку, охрану лесов, борьбу с лесными пожарами, лесовосстановление и т. д. Чтобы обеспечить круглогодичную доступность, лесные транспортные пути должны быть спроектированы и построены таким образом, чтобы избежать проблем с доступностью, больших затрат на их содержание и строительство [10–12]. Недостаточная развитость лесотранспортной инфраструктуры и/или ее плохое качество в некоторых районах могут увеличить затраты на транспортировку заготовленной древесины и недревесной продукции леса, которые составляют значительную часть себестоимости лесопродукции [13; 14].

Перемещение заготовленной древесины включает в себя ряд операций, в том числе строительство дорог, планирование ресурсов, погрузку и разгрузку, а также вторичную транспортировку [15; 16]. Чтобы обеспечить устойчивость лесной экосистемы, строительство лесотранспортной сети должно быть стратегически спланировано с тщательным учетом эффективности транспортировки при минимизации негативного воздействия на почвогрунты и экологического нарушения окружающей среды [17–20]. Это требует комплексного подхода к планированию лесотранспортной инфраструктуры, который включает в себя оценку таких факторов, как рельеф местности, типы почвогрунтовых условий и экологические ограничения, а

также выбор наиболее подходящих трасс [21]. Применяя этот подход, лесопользователи могут добиваться того, чтобы транспортировка заготовленной древесины, недревесной продукции леса осуществлялась таким образом, который поддерживает устойчивость лесной экосистемы.

За последние несколько десятилетий в лесозаготовительном производстве Российской Федерации стали доминировать мощные и тяжелые, в основном колесные лесные машины [22; 23]. Такая тяжелая техника, в первую очередь, приводит к нарушению почвогрунтов и тем самым наносит ущерб лесным экосистемам [24–26].

Нарушение почвогрунтов является серьезной проблемой во время движения лесных машин, при этом уплотнение почвогрунта, образование колеи и скарификация являются наиболее распространенными формами нарушения (рис. 1) [27]. Уплотнение почвогрунта происходит из-за увеличения его объемной плотности, что приводит к уменьшению макропор, необходимых для роста корней и гидрологического стока. Колея обычно появляется во влажных условиях. Смещение почвогрунта происходит, когда грунт смещается вбок во время пластической деформации в условиях его насыщения влагой [28].

Тяжелые лесные машины, и особенно наземные трелевочные системы, используемые при лесосечных работах, приводят к большему уплотнению почвогрунта, чем более легкие машины. Уплотнение почвогрунта, образование колеи и удаление лесной подстилки (скарификация) являются обычными последствиями использования наземной трелевочной техники.



Рис. 1. Образование колеи и боковое смещение почвогрунта после первого прохода колесного форвардера по влажному почвогрунту (июнь 2023 г., Выборгский район Ленинградской области)

Лесные почвогрунты значительно отличаются в зависимости от региона, количества органического материала, типа леса, и т. д., что приводит к различиям в значениях их уплотнения [29]. Кроме того, при правильном ведении работ нарушение почвогрунтов ограничивается определенными участками, такими как трелевочные волоки и технологические коридоры. Степень уплотнения почвогрунтов варьируется в

зависимости от различных факторов, таких как начальная структура, влажность, количество проходов лесных машин, тип двигателя, вес машин и трелевочных систем и уклон местности [30].

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее существенное воздействие на плодородный слой почвогрунта оказывают несколько первых проходов лесных машин, а последующие проходы оказывают более слабое воздействие. Степень повреждения почвогрунтов растет с увеличением количества проходов [30]. Уплотнение почвогрунта имеет множество негативных последствий, таких как уменьшение пористости почвы, ограничение микробной активности, снижение инфильтрации и гидравлической проводимости. Однако умеренное уплотнение почвогрунта даже может привести к повышению плодородности за счет улучшения контакта корневой системы лесных растений и частиц почвы [31; 32].

Материалы и методы исследования. Используемые методы натурных экспериментальных исследований в производственных условиях, а также литературные источники и справочные данные о строении и физико-механических свойствах лесных почвогрунтов.

Результаты исследования. Чтобы свести к минимуму ущерб окружающей среде во время лесосечных и лесохозяйственных работ, важно учитывать влияние двигателей лесных машин на уплотнение почвогрунтов. Использование различных видов колесных гусениц, более легких лесных машин, оптимизация режимов их работы могут уменьшить неблагоприятное воздействие на почвогрунты [30].

Кроме того, разрушение структуры и уплотнение почвогрунта можно свести к минимуму за счет использования подстилки из порубочных остатков (кустарниковых матов) на трелевочных волоках и ограничения количества проходов лесных машин по одному следу [30]. Во время проведения работ кустарниковые маты увеличивают общую несущую способность волока или технологического коридора и улучшают его проходимость. Кроме того, они обеспечивают некоторую защиту почвогрунта, особенно в условиях его высокой влажности [33].

Чаще всего создание кустарниковых матов происходит во время механизированной заготовки древесины, предусматривающей обрезку сучьев на пасеке. Хотя и харвестер также может укладывать порубочные остатки на трелевочные волоки и технологические коридоры. Маты из порубочных остатков эффективны, поскольку они распределяют вес машины по большей площади, снижая давление на почвогрунт. Укладка порубочных остатков на трелевочные волоки и технологические коридоры является одним из наиболее распространенных способов очистки лесосек в России.

Участки трелевочных волоков и технологических коридоров, покрытые порубочными остатками плотностью от 15 до 25 кг/м², испытывают меньшее уплотнение почвогрунта, чем участки без порубочных остатков. Степень уплотнения почвогрунта снижается по мере увеличения количества порубочных остатков, при этом большая их плотность (40 кг/м²) более эффективна, чем более легкая (7–8 кг/м²). Но важно отметить, что использование порубочных остатков не может полностью устранить уплот-

нение и деформацию почвогрунта, поскольку под слоем порубочных остатков он все еще может испытывать уплотнение на глубину до 0,5 м.

Эффективность защиты почвогрунтов порубочными остатками различна для разных природно-производственных условий и зависит от ряда факторов, таких как состав и количество порубочных остатков, уровень влажности почвогрунта, количество проходов машин по одному следу, особенности рельефа и сложения почвогрунта [34]. Кроме того, порубочные остатки могут использоваться для строительства временных лесных дорог наряду с использованием деревянных инвентарных щитов, геосинтетических материалов, пластиковых щитов и т. д.

Использование системы покрытия дорог, волоков, технологических коридоров потенциально может привести к снижению шума, сопротивления качению и пыления за счет улучшения текстуры поверхности движения. Это, в свою очередь, может свести к минимуму динамические вибрации машин [30]. С другой стороны, мобильные дорожные покрытия могут столкнуться с проблемами из-за недостаточного сцепления, особенно в сезон дождей или весеннего оттаивания почвогрунтов. Кроме того, улучшение текстуры поверхности движения может эффективно снизить износ шин по сравнению с транспортными путями без покрытия, что также приводит к снижению потребления топлива [35].

Сравнительные исследовательские испытания сборно-разборных дорожных покрытий проводились в условиях Иркутской области и Республики Саха (Якутия) в осенний период 2023 г. Преобладающими почвами являлись глеевые торфянисто-перегнойные и мерзлотно-таежные. Преобладающей породой на лесных участках являлась лиственница сибирская (*Lárix sibirica*).

Были сформированы экспериментальные участки размером 500×500 м с однородными почвогрунтовыми характеристиками.

На участках выбраны прямоугольные полосы длиной 400 м и шириной 5 м, которые выступали в качестве трасс движения лесной машины. После этого участок разделяли на 3 секции длиной 100 м с расстоянием между каждой 50 м (рис. 2). Перед проведением испытаний на участках удаляли всю растительность и органический мусор.

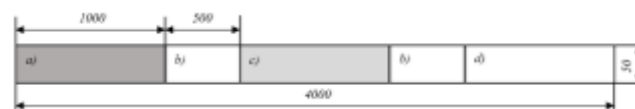


Рис. 2. Экспериментальный макет испытательного участка: *a* — участок с пластиковыми щитами; *b* — расстояние между участками; *c* — участок с покрытием из порубочных остатков; *d* — контрольный участок

На участке *a* использованы пластиковые маты (щиты) одного из ведущих российских производителей такой продукции со следующими характеристиками: длина — 4 000 мм, ширина — 2 000 мм, высота — 102 мм; полезная площадь — 6,84 м²; масса — 360 кг; допустимая нагрузка при сжатии — 415 т/м²; максимальная нагрузка при эксплуатации >200 т.

Общее количество пластиковых щитов — 50 ед.

На участке *b* использовали порубочные остатки, сучья и ветви диаметром 10–60 мм, длиной 1–3 м. Порубочные остатки размещали на участке с плотностью 10 кг/м².

На участке *c* дополнительных приемов укрепления еzdовой поверхности не использовали.

До проведения исследования отбирали пробы с использованием оригинального прибора для взятия проб почвогрунта (рис. 3) [42]. Пробы отбирали в шести местах. В качестве значений для сравнения использовали пробы, отобранные на участках до проведения испытаний, усредняя все полученные значения изучаемых показателей по всему участку. Таким образом, контрольные значения касались не нарушенного почвогрунта. В общем была отобрана 51 проба (4 пробы × 3 участка × 3 повтора после исследования и 5 проб × 3 участка для контроля).

Во время испытаний измеряли влажность почвогрунта, насыпную плотность, количество органического материала. Насыпную плотность принимали как массу сухого почвогрунта в единице объема влажного.

Влажность почвы измеряли как разницу между массой влажной и сухой почвой (после высушивания при 60 °С до постоянной массы).

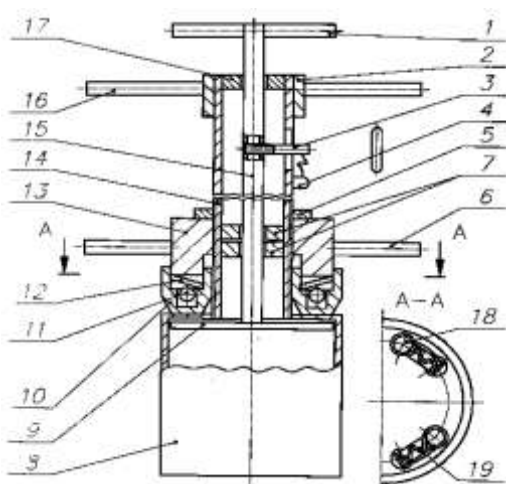


Рис. 3. Устройство для вырезания отбора проб почвы: 1 — ручка выталкивателя; 2 — муфта; 3 — поводок; 4 — выключатель концевой; 5 — контргайка (ГОСТ 8961-75); 6 — упор нижний; 7 — втулка направляющая; 8 — нож цилиндрический; 9 — выталкиватель; 10 — корпус; 11 — шарик; 12 — пружина дисковая; 13 — муфта; 14 — труба (3/4"); 15 — труба (8–10); 16 — упор верхний; 17 — втулка направляющая; 18 — шарик; 19 — пружина

Концентрацию органического вещества измеряли следующим образом. 1 г высушенного почвогрунта диспергировали в 5 см³ поливольфрамата натрия (концентрацией 1,85 г/см³). После чего легкую фракцию отделяли, тяжелую промывали от диспергирующего вещества и просеивали через сито 53 мкм. Фракцию глины фракционировали центрифугированием, высушивали при 60 °С до постоянной массы и проверяли с помощью масс-спектрометрии изотопного соотношения [36].

В исследовании был использован форвардер *Ponsse Buffalo* со следующими характеристиками: движитель — колесный; двигатель — дизельный, мощностью 205

кВт; максимальная скорость — 20 км/ч; вес — 21 100 кг; грузоподъемность — 18 000 кг; габариты: ширина — 3 300 мм; длина — 10 860 мм; высота — 3 910 мм; дорожный просвет — 730 мм.

Все данные рассчитывали как среднее из трех значений для каждой глубины и каждого параметра отдельно. Статистический анализ проводили с использованием одностороннего теста *Anova* на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Графические данные получали с помощью *Excel* (2013).

Сухая насыпная плотность почвогрунта до проведения испытаний составляла 0,35–1,21 т/м³. При этом с увеличением глубины плотность увеличивается на 70 %. На глубине 0,1 м сухая насыпная плотность равна 0,39±0,02; 0,2 м — 0,66±0,03; 0,3 м — 1,18±0,02 т/м³.

После прохождения форвардера значение плотности изменилось в большую сторону (рис. 4–6).

Испытательный участок, где дополнительных средств укрепления еzdовой поверхности не использовали, претерпел самые большие изменения (рис. 4). На минимальной глубине значения плотности находились в промежутке 0,64–1,12 т/м³. С увеличением глубины на 0,1 м плотность составляет примерно 116 % от предыдущего значения и равна 1,02±0,19 т/м³, а на глубине 0,3 м еще на 28 % больше — 1,28±0,05 т/м³. Анализируя место отбора проб, можно отметить, что на участках воздействия шин уплотнение было максимальным, тогда как в центральной зоне значения менялись меньше всего. При этом на максимальной глубине не наблюдалось статистически отличимых данных. Максимальное изменение в плотности (+194 %) наблюдалось на участках контакта с колесами в верхних слоях почвогрунта. Кроме того, в этих точках значения были наибольшими на всех глубинах. С увеличением глубины влияние на почвогрунт уменьшается: 0,1 м — 64–194; 0,2 м — 21,5–83,8; 0,3 м — 2,5–11,6 %.

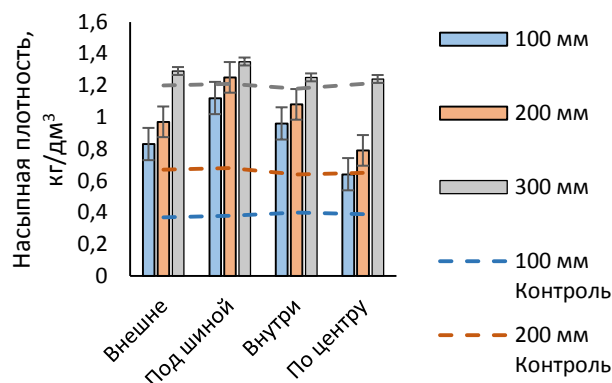


Рис. 4. Насыпная плотность на участке *a*

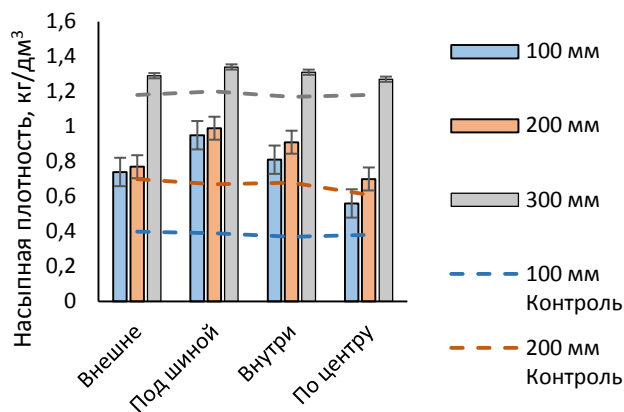


Рис. 5. Насыпная плотность на участке *b*

При использовании порубочных остатков уплотнение почвогрунта было ниже (рис. 5). Тенденция изменения значений схожа. Так, на глубине 0,1 м насыпная плотность составляет 0,56–0,95 т/м³. Измерение на 0,2 м показало, что средняя плотность увеличилась на 0,13 т/м³ (или 10–34 %) относительно контрольного значения и составляет 0,84±0,13 т/м³, тогда как на 0,3 м составляет 1,30±0,03 т/м³, что всего на 8–12 % больше по сравнению с контрольным значением. Как и в предыдущем случае, наибольшие значения уплотнения наблюдались в точках воздействия шин — на 47–144 %. Необходимо отметить, что уплотнение почвогрунта с внешней стороны следа и в центральной зоне статистически не изменилось относительно контрольного значения.

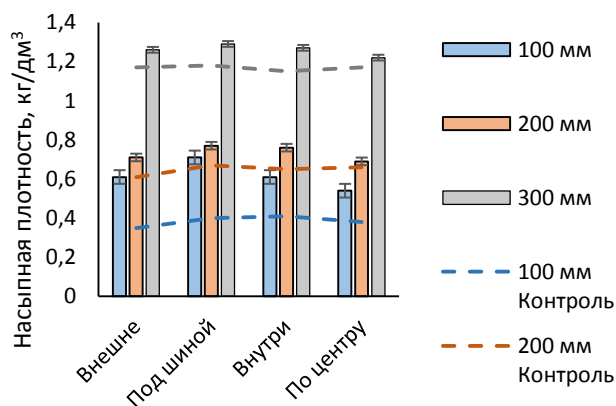


Рис. 6. Насыпная плотность на участке *c*

Использование пластиковых матов показало следующие результаты (рис. 6). Минимальные значения, как и в предыдущих случаях, наблюдали в образцах с глубины 0,1 м — 0,54–0,71 т/м³. Влияние на больших глубинах было меньше. Так, при 0,2 м плотность составила 0,69–0,77 т/м³, а 0,3 м — 1,22–1,29 т/м³, или 5–17 и 4–10 % соответственно. При оценке результатов по месту расположения точек отбора проб следует отметить, что в приближенных точках к месту контакта с колесами значения были больше.

Результаты анализа влажности почвогрунта представлены на рис. 7–9.

Значение влажности почвы на глубине 0,1 м составляет 53,4; 50,4; 47,6 и 48,0 % для точек, расположенных справа от колеса, под ним, слева и по центру участка (рис. 7). Сравнивая эти значения с контрольными (76,8; 78,4; 70,5; 75,4 %), наблюдаем снижение влажности при проходе форвардера по незащищенной площадке. С увеличением глубины разница между контрольными и испытуемыми значениями уменьшается до 5–10 % (на 0,3 м) и 18–24 %.

После использования порубочных остатков количество влаги намного выше (рис. 8). Средняя влажность на глубине 0,1 м составляет 68,1 %, что всего на 6,3 % меньше, чем на контрольном. При этом разница между значениями на 0,2 м возрастает до 9–14 %, тогда как на 0,3 м — всего 1–13 %. Такие отличия могут быть связаны с различиями в проницаемости слоев почвогрунта на разных глубинах.

Во всех точках наблюдается увеличение значений влажности почвогрунта при использовании пластикового щита по сравнению с контрольными значениями. Максимальные отличия сравнительно с контролем наблюдались на минимальной глубине (0,1 м). Так, значения составляют 77,6±2,1 %, тогда как до использования щитов на этом участке влажность была 74,0±2,1 %. С увеличением глубины влажность (контрольные значения) уменьшалась до 60,6±0,4 и 29,8±1,5 % на 0,2 м и 0,3 м соответственно, тогда как при эксперименте — 61,7±0,9 и 31,4±1,5 %.

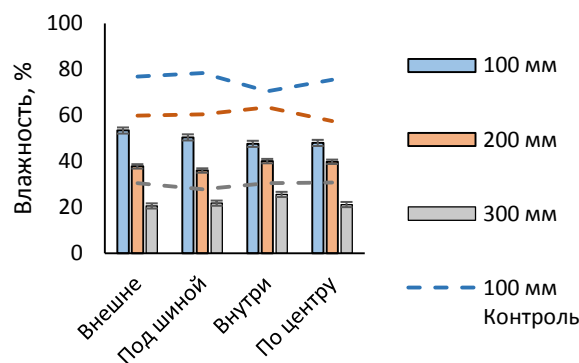


Рис. 7. Влажность почвогрунта на участке *a*

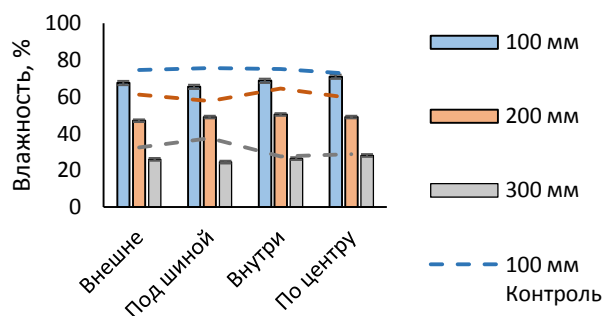


Рис. 8. Влажность почвогрунта на участке *b*

В то же время, на участке, где использовали пластиковые щиты, наблюдали абсолютно противоположные результаты (рис. 9).

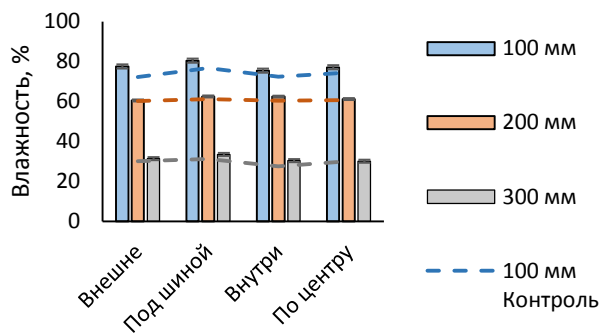


Рис. 9. Влажность почвогрунта на участке *c*

Также было исследовано влияние воздействия движителя лесной машины на содержание органического материала. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 10–12.

Как видим, прохождение форвардера негативно влияет на содержание органики, особенно в верхних слоях почвогрунта. Разница в значениях контроля и экспериментальных данных составляет 4–8 % (на 0,1 м). При этом на нижних слоях почвогрунта (0,2 и 0,3 м) наблюдается увеличение значений или отсутствие статистически значимых отличий: 8,4–9,8 % для контроля и 7,5–11,4 % для эксперимента на 0,2 м; 1,2–2,1 % (контроль) и 1,2–2,2 % (эксперимент) на 0,3 м.

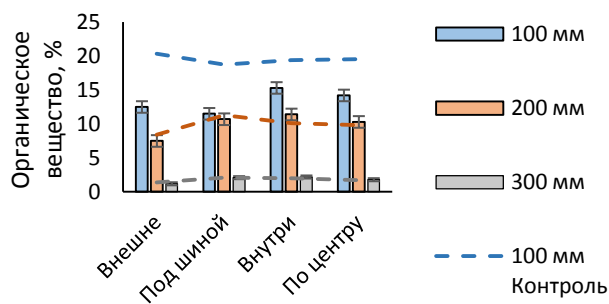


Рис. 10. Концентрация органической материи в почвогрунте на участке *a*

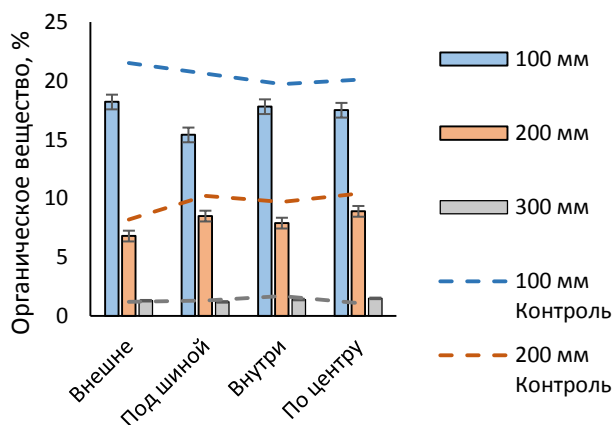


Рис. 11. Концентрация органической материи в почвогрунте на участке *b*

Наличие порубочных остатков (рис. 12) позволяет сохранить больше органики, но значительных положительных результатов не наблюдалось. На минимальной глубине почвогрунта концентрация не была меньше

15 %, тогда как контрольные значения составляли 19,7–21,5 %. При этом разница в значениях уменьшается с увеличением глубины почвогрунта (1–2 % на 0,2 м и 0,1–0,4 % на 0,3 м).

Содержание органики в почвогрунте на участке с пластиковыми щитами в большинстве случаев не изменялось. Так, на глубине 0,1 м концентрация составляла 18,5–22,0 %, а после эксперимента — 18,5–20,9 %. При этом на больших глубинах наблюдали изменения в положительную сторону — максимум до +1 %.

Анализируя эти результаты, можно сделать вывод, что воздействие движителя форвардера на почвогрунт привело к снижению влажности во всех изученных точках. Это может быть связано с уплотнением почвогрунта, увеличением испарения или другими факторами. Увеличение влажности почвогрунта может быть результатом уменьшения испарения влаги и более эффективного сохранения влаги под пластиковым щитом, что связано с отсутствием массообмена между почвогрунтом и воздухом. В случае использования порубочных остатков такой процесс частично присутствует, поэтому значения влажности меньше. Анализируя точки, расположенные с внешней стороны следа форвардера и на минимальной глубине, можно заметить повышенные значения влажности, что, возможно, связано с тем, что вода в почвогрунт может поступать извне.

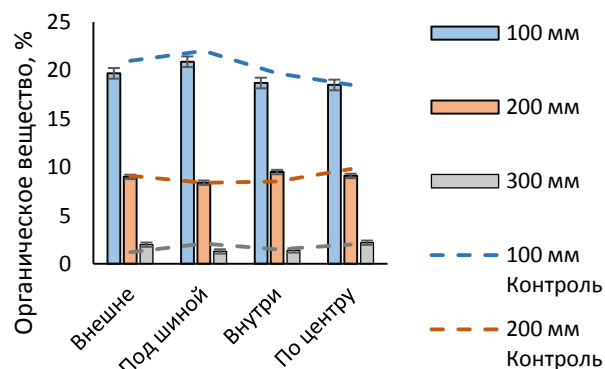


Рис. 12. Концентрация органической материи в почвогрунте на участке *c*

Использование лесных машин приводит к уплотнению плодородного слоя почвогрунта, уменьшению влажности и органической материи. В [37] установили, что содержание органического вещества уменьшается примерно на 6 % после воздействия на почву. Движение машин приводит к нарушению почвы, вследствие чего органическая материя может быть транспортирована далее на движителях. Кроме того, в ходе транспортировки может быть нарушен микробиоценоз, который и составляет большую часть органического вещества. Кислотность почвы также изменяется в ходе увеличения концентрации углекислого газа в кислую сторону. Такое значение pH может негативно влиять как на растительность, так и микроорганизмы почвы [38]. В [39] исследовали влияние транспортировки на физические характеристики почв. Аналогично данной работе авторы установили, что с увеличением глубины насыпная плотность растет. Значения составляли от $1,26 \pm 0,03$ до $1,35 \pm 0,05$ г/см³ на глубине до 10 и 20 см соответственно. В нашем же случае плотность была в

2–3 раза меньше, что, по всей видимости, связано с исследованием другого типа почвы.

В [40] провели наиболее схожее с нашим исследование. Использовали укрытие органическим материалом разной плотности (от 5 до 20 кг/м²). Было установлено, что увеличение количества органического материала позитивно влияет на защиту почв от образования колеи, смещения почвы и других характеристик. В [41] показали, что влажность почвы снижается в нижних слоях почвы, что аналогично полученным результатам. Кроме того, насыпная плотность почвы увеличивается с углублением, но использование покрова из органических материалов уменьшает эти характеристики, как и в данном исследовании.

Выводы. В работе было изучено два подхода защиты почвогрунта от негативного воздействия движителей лесных машин на примере порубочных остатков и пластиковых матов. Было установлено, что и порубочные остатки, и пластиковые маты уменьшали повреждения. Так, насыпная плотность почвогрунта на участке с укрытием из порубочных остатков составляет 0,77±0,16 т/м³ на глубине 0,1 м; 0,84±0,13 т/м³ на глубине 0,2 м и 1,30±0,03 т/м³ на глубине 0,3 м, или 147–244; 110–148 и 108–112 % со-

ответственно, а с пластиковыми матами — 0,62±0,07 т/м³; 0,73±0,04 т/м³ и 1,26±0,03 т/м³, что составляет 142–178; 105–117 и 104–110 % относительно контроля соответственно. Влажность почвогрунта составила 68,13±2,30; 48,85±1,40; 26,25±1,25 % для порубочных остатков и 77,60±2,08; 61,65±0,97; 31,35±1,54 % для пластикового мата с увеличением глубины соответственно. Содержание органического вещества на глубине 0,1 м составило 17,23±1,25 и 19,45±1,10 %; 0,2 м — 8,03±0,91 и 9,00±0,45 %; 0,3 м — 1,35±0,13 и 1,73±0,44 % для порубочных остатков и пластикового мата соответственно.

Таким образом, пластиковые щиты являются более эффективным методом защиты почвогрунта, чем порубочные остатки. Поэтому необходимо более детально исследовать их практическое применение в различных природно-производственных условиях.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/.

Литература

1. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Иностраный опыт агролесоводства для повышения эффективности лесопользования // Наука и инновации: векторы развития: материалы Междунар. науч.-практической конф. молодых ученых (24–25 окт. 2018 г.). Барнаул, 2018. С. 82–85.
2. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Возможности биоконсервации при проведении сплошных рубок леса // Биоразнообразие. Биоконсервация. Биомониторинг: сб. материалов Междунар. науч.-практической конф., посвящ. 10-летию образования лаборатории биоэкологического мониторинга беспозвоночных животных Адыгеи. Майкоп, 2013. С. 109–111.
3. Grigorev I., Ivanov V., Gasparian G., Nikiforova A., Khitrov E. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // 14th international multidisciplinary scientific geosconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 443–446.
4. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Сохранение биоразнообразия при заготовке древесины в горных лесах // Биоразнообразие. Биоконсервация. Биомониторинг: сб. материалов II Междунар. науч.-практической конф., посвящ. 75-летию Адыгейского гос. ун-та (14–16 окт. 2015 г.). Майкоп, 2015. С. 134–135.
5. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Эффективность лесопользования в России // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 5. С. 24–30.
6. Григорьева О.И., Елтышева М.О., Иванова Е.А. Оценка экологических функций насаждений Охтинского учебно-опытного лесхоза // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2007. № 19. С. 103–105.
7. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Основные направления обеспечения экологической безопасности лесозаготовительного производства // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 202–205.
8. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 51–55.
9. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Перспективные направления повышения качества подготовки специалистов в области лесопользования // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 205–208.
10. Зорин М.В., Григорьев И.В. Особенности монтажа сборно-разборных покрытий из пластиковых матов при строительстве временных лесных дорог и транспортных коридоров // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24–28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 79–82.
11. Зорин М.В., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Безопасность и охрана труда при строительстве временных лесных дорог и технологических коридоров из пластиковых сборно-разборных покрытий // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 2. С. 37–52.
12. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В. Требования к перспективным сборно-разборным конструкциям для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (24 мая 2022 г.). Петрозаводск, 2022. С. 51–52.
13. Боргунутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2022. № 2 (386). С. 146–158.
14. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25, № 3. P. 678–694.
15. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. II All-Russian Scientific-Technical Conference «Digital Technologies in Forest Sector», 2021. P. 012025.

16. Рого Г.Э., Воронов Р.В., Григорьев И.В. Алгоритм локального поиска для задачи покрытия полигона лесом корневыми деревьями // Инженерный вестн. Дона. 2022. № 10 (94). С. 240-259.
17. Ковалев Р.Н., Еналеева - Бандура И.М., Баранов А.Н., Лозовой В.А., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учетом параметров лесотранспортной сети // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 64-71.
18. Ковалев Р.Н., Еналеева - Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда // Resources and Technology. 2021. V. 18, № 4. P. 77-92.
19. Ковалев Р.Н., Еналеева - Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения эффективности доставки сил и средств пожаротушения с учетом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 57-62.
20. Ковалев Р.Н., Еналеева - Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения общей стоимости ресурсов лесных земель с учётом уровня развития лесотранспортной сети // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 102-117.
21. Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевкой // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 39-44.
22. Хахина А.М., Макуев В.А., Тихнов Е.А., Чемшикова Ю.М., Долматов Н.П., Григорьев И.В. Анализ взаимодействия колесных лесных машин с почвогрунтами лесосек // Деревообрабатывающая пром-сть. 2023. № 1. С. 10-28.
23. Хахина А.М., Григорьев И.В., Газизов А.М., Куницкая О.А. Статистический анализ параметров колесных трелевочных машин // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т. 36, № 2. С. 189-197.
24. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным двигателем на почвогрунты на склонах // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 64-84.
25. Grigorieva O.I., Runova E.M., Storodubtseva T.N., Urazova A.F., Voronova A.M., Ivanov V., Shvetsova V.V., Grigorev I.V. Comparative analysis of thinning techniques in gar-chinsky forestry // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. V. 9, № 2. P. 762-770.
26. Каляшов В.А., До Т.А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 2. P. 1-47.
27. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА, 2006. 236 с.
28. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоошадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.
29. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125-134.
30. Анисимов Г.М., Григорьев И.В., Жукова А.И. Экологическая эффективность трелевочных тракторов. СПб.: СПб ГЛТА, 2006. 352 с.
31. Рудов С.Е., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв. - 12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 38-41.
32. Каляшов В.А., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Перспективные варианты восстановления лесов на склонах // Вестн. АГАТУ. 2022. № 1 (5). С. 86-96.
33. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Эффективная технология расчистки древесно-кустарниковой растительности // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (25 мая 2021 г.). Петрозаводск, 2021. С. 34-35.
34. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 3. P. 1-29.
35. Григорьев И.В., Зорин М.В., Рудов М.Е. Современные способы укрепления временных лесовозных дорог и трелевочных волоков // 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. 278-285.
36. Soong J.L., Cotrufo M.F. Annual burning of a tallgrass prairie inhibits C and N cycling in soil, increasing recalcitrant pyrogenic organic matter storage while reducing N availability // Global change biology. 2015. № 21 (6). P. 2321-2333.
37. Venanzi R., Picchio R., Piovesan G. Silvicultural and logging impact on soil characteristics in Chestnut (Castanea sativa Mill.) Mediterranean coppice // Ecological Engineering. 2016. № 92. P. 82-89.
38. Alekseenko A.V., Drebenstedt C., Bech J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate // Environmental Geochemistry and Health. 2022. № 44 (5). P. 1581-1603.
39. Lee E., Li Q., Eu S., Han S.K., Im S. Assessing the impacts of log extraction by typical small shovel logging system on soil physical and hydrological properties in the Republic of Korea // Heliyon. 2020. № 6 (3). P. 03544.
40. Poltorak B.J., Labelle E.R., Jaeger D. Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats // Soil and Tillage Research. 2018. № 179. P. 96-104.
41. Labelle E.R., Poltorak B.J., Jaeger D. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance // Canadian Journal of Forest Research. 2019. № 49 (2). P. 164-178.
42. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И. Устройство для взятия проб почвы: пат. на полезную модель № 32277; заявл. 14.05.2003; опубл. 10.09.2003. Бюл. № 25.

References

1. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B. Foreign experience of agroforestry for improving the efficiency of forest management // Nauka i innovacii: vektory razvitiya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh (24-25 okt. 2018 g.). Barnaul, 2018. P. 82-85.
2. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I. Possibilities of bioconservation during continuous logging // Bioraznoobrazie. Biokonservaciya. Biomonitoring: sb. materialov Mezhdun-

- nar. nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. 10-letiyu obrazovaniya laboratorii bioekologicheskogo monitoringa bespozvonochnyh zhivotnyh Adygei. Majkop, 2013. P. 109-111.
3. Grigorev I., Ivanov V., Gasparian G., Nikiforova A., Khitrov E. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 443-446.
 4. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Conservation of biodiversity during timber harvesting in mountain forests // Bioraznoobrazie. Biokonservatsiya. Biomonitring: sb. materialov II Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. 75-letiyu Adygejskogo gos. un-ta (14-16 okt. 2015 g.). Majkop, 2015. P. 134-135.
 5. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Efficiency of forest management in Russia // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2016. № 5. P. 24-30.
 6. Grigor'eva O.I., Eltyshva M.O., Ivanova E.A. Assessment of the ecological functions of the plantations of the Okhta educational and experimental forestry // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2007. № 19. P. 103-105.
 7. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. The main directions of ensuring environmental safety of logging production // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. V. 3, № 2-1 (13-1). P. 202-205.
 8. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Improving the environmental efficiency of forestry production // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2014. V. 2, № 3-4 (8-4). P. 51-55.
 9. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Promising directions for improving the quality of training of specialists in the field of forest management // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. V. 3, № 2-2 (13-2). P. 205-208.
 10. Zorin M.V., Grigor'ev I.V. Features of installation of collapsible coatings made of plastic mats during the construction of temporary forest roads and transport corridors // Aktual'nye problemy lesnogo hozjajstva i derevopererabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 79-82.
 11. Zorin M.V., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Safety and labor protection in the construction of temporary forest roads and technological corridors made of plastic collapsible coatings // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2023. № 2. P. 37-52.
 12. Manukovskij A.Yu., Zorin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V. Requirements for promising collapsible structures for the construction of temporary forest roads and technological corridors // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Vos'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (24 maya 2022 g.). Petrozavodsk, 2022. P. 51-52.
 13. Borgonutdinov A.M., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Efimov D.S., Shvecova V.V. Experimental studies of the thermal regime in the layers of the road surface of main logging roads // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2022. № 2 (386). P. 146-158.
 14. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25, № 3. P. 678-694.
 15. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. II All-Russian Scientific-Technical Conference «Digital Technologies in Forest Sector», 2021. P. 012025.
 16. Rego G.E., Voronov R.V., Grigor'ev I.V. Local search algorithm for the problem of covering a polygon with a forest of root trees // Engineering journal of Don. E-journal. 2022. № 10 (94). P. 240-259.
 17. Kovalev R.N., Enaleeva - Bandura I.M., Baranov A.N., Lozovoj V.A., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Method for evaluating the effectiveness of reforestation measures taking into account the parameters of the forest transportation network // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 4 (56). P. 64-71.
 18. Kovalev R.N., Enaleeva - Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. A mathematical model for determining the optimal location of forest fire and chemical stations, taking into account the level of development of transport networks in the territory of the forest fund // Resources and Technology. 2021. V. 18, № 4. P. 77-92.
 19. Kovalev R.N., Enaleeva - Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. A mathematical model for determining the effectiveness of the delivery of fire extinguishing forces and means, taking into account the level of development of the transport network in the territory of the forest fund // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 4 (52). P. 57-62.
 20. Kovalev R.N., Enaleeva - Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. A mathematical model for determining the total cost of forest land resources taking into account the level of development of the forest transportation network // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 102-117.
 21. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Coordinate-volumetric tracing technique in the development of logging sites by skidding // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2004. № 4. P. 39-44.
 22. Hahina A.M., Makuev V.A., Tihnov E.A., Chemshikova Yu.M., Dolmatov N.P., Grigor'ev I.V. Analysis of interaction of wheeled forest machines with soils of logging areas // Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2023. № 1. P. 10-28.
 23. Hahina A.M., Grigor'ev I.V., Gazizov A.M., Kunickaya O.A. Statistical analysis of parameters of wheeled skidding machines // Conifers of the boreal area. 2018. V. 36, № 2. P. 189-197.
 24. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigor'eva O.I., Hitrov E.G. Methodology and results of experimental studies of the impact of forest machines with a caterpillar engine on soils on slopes // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 64-84.
 25. Grigorieva O.I., Runova E.M., Storodubtseva T.N., Urazova A.F., Voronova A.M., Ivanov V., Shvetsova V.V., Grigorev I.V. Comparative analysis of thinning techniques in gar-chinsky forestry // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. V. 9, № 2. P. 762-770.
 26. Kalyashov V.A., Do T.A., Hitrov E.G., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern machine systems and technologies of wood harvesting and reforestation in conditions of mountain cutting areas // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 2. P. 1-47.
 27. Grigor'ev I.V. Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by substantiating their movement modes and technological equipment. SPb.: Izd-vo LTA, 2006. 236 p.
 28. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Environmental technologies for the development of logging sites in the conditions of the Northwestern region of the Russian Federation. SPb.: Izd-vo LTA, 2008. 176 p.
 29. Voronov R.V., Markov O.B., Grigor'ev I.V., Davtyan A.B. Mathematical model of the modular selection principle machine systems for the creation and operation of forest plantations // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 5 (371). P. 125-134.
 30. Anisimov G.M., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Ecological efficiency of skidding tractors. SPb.: SPb GLTA, 2006. 352 p.

31. Rudov S.E., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Effective restoration of forests on permafrost // *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov* (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 38-41.
32. Kalyashov V.A., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Promising options for forest restoration on slopes // *Vestnik ASAU (Scientific journal of Arctic State Agrotechnological University)*. 2022. № 1 (5). P. 86-96.
33. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B. Effective technology of clearing woody and shrubby vegetation // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Sed'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem* (25 maya 2021 g.). Petrozavodsk, 2021. P. 34-35.
34. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Gur'ev A.Yu., Grigor'eva O.I., Hitrov E.G. Theoretical studies of the operation of forest machines with a caterpillar engine on slopes // *Resources and Technology*. 2022. V. 19, № 3. P. 1-29.
35. Grigor'ev I.V., Zorin M.V., Rudov M.E. Modern ways of strengthening temporary logging roads and skidding lines // *Upravlenie zemelnymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 255-letiyu Zemleustroystvu Yakutii i Godu nauki i tekhnologii* (26 fevr. 2021 g.). Yakutsk, 2021. P. 278-285.
36. Soong J.L., Cotrufo M.F. Annual burning of a tallgrass prairie inhibits C and N cycling in soil, increasing recalcitrant pyrogenic organic matter storage while reducing N availability // *Global change biology*. 2015. № 21 (6). P. 2321-2333.
37. Venanzi R., Picchio R., Piovesan G. Silvicultural and logging impact on soil characteristics in Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Mediterranean coppice // *Ecological Engineering*. 2016. № 92. P. 82-89.
38. Alekseenko A.V., Drebenstedt C., Bech J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. № 44 (5). P. 1581-1603.
39. Lee E., Li Q., Eu S., Han S.K., Im S. Assessing the impacts of log extraction by typical small shovel logging system on soil physical and hydrological properties in the Republic of Korea // *Heliyon*. 2020. № 6 (3). P. 03544.
40. Poltorak B.J., Labelle E.R., Jaeger D. Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats // *Soil and Tillage Research*. 2018. № 179. P. 96-104.
41. Labelle E.R., Poltorak B.J., Jaeger D. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance // *Canadian Journal of Forest Research*. 2019. № 49 (2). P. 164-178.
42. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I. Device for taking soil samples: pat. na poleznuyu model' № 32277; zayavl. 14.05.2003; opubl. 10.09.2003. Byul. № 25.