УДК 630*375

ЗАЩИТА ПОЧВОГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ОТ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

Елисеев Айсен Васильевич
Студент, Арктический государственный агротехнологический университет
г. Якутск, Россия
e-mail: aiseneliseev2@gmail.com
Хохлов Артём Анатольевич
Генеральный директор, ООО «Строительное управление 8», г. Москва, Россия
e-mail: T.igorevna123@yandex.ru
Михайлова Люция Михайловна
Старший преподаватель, Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск, Россия
e-mail: lyutsiya.losotova@mail.ru
Новиков Марат Семенович
Аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет
г. Якутск, Россия
e-mail: novikov-ms@yakutskenergo.ru
Должиков Илья Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: idolzhikov222@mail.ru
Григорьева Ольга Ивановна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: grigoreva_o@list.ru

Аннотация. Объектом исследования являются процессы взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами в условиях криолитозоны. Целью работы является разработка практических рекомендаций по снижению негативного воздействия лесозаготовительной техники на почвогрунты в Республики Саха (Якутия) с учётом местных климатических и грунтовых условий. Выполнен анализ литературных источников, полевые наблюдения на лесосеках Якутии, сравнение типов движителей, расчёт давления на почвогрунт, экономическая оценка. Выявлены основные факторы разрушения почвогрунтов в криолитозоне; обоснована целесообразность применения широкопрофильных гусеничных

движителей и сезонных ограничений; разработаны организационно-технологические мероприятия по защите почвенного покрова в криолитозоне. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Результаты настоящей работы получены за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00047, https://rscf.ru/project/26-16-00047/.

Ключевые слова: почвогрунты, лесные машины, движители, Республика Саха (Якутия), многолетняя мерзлота, защита почв, гусеничные движители.

PROTECTION OF CRYOLITHOZONE SOILS FROM THE NEGATIVE EFFECTS OF FOREST MACHINERY PROPELLERS

Eliseev Aisen Vasilyevich
Student, Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia
Khokhlov Artem Anatolyevich
General Director, SU 8 LLC, Moscow, Russia,
Mikhailova, Lucia Mikhailovna
Senior Lecturer, Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia
Novikov Marat Semenovich
Postgraduate student, Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia
Dolzhikov Ilya Sergeevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia
Grigoreva Olga Ivanovna
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, Russia

Abstract. The object of the study is the processes of interaction of forest machinery propellers with soils in cryolithozone conditions. The aim of the work is to develop practical recommendations for reducing the negative impact of logging equipment on soils in the Republic of Sakha (Yakutia), taking into account local climatic and soil conditions. The analysis of literary sources, field observations on the logging areas of Yakutia, comparison of types of propellants, calculation of pressure on the soil, and economic assessment were carried out. The main factors of soil destruction in the cryolithozone have been identified; The expediency of using wide-profile tracked propulsion systems and seasonal restrictions is substantiated; organizational and technological measures have been developed to protect the soil cover in the cryolithozone. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative

developments in the field of the logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological University. The results of this work were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 26-16-00047, https://rscf.ru/project/26-16-00047 /.

Keywords: soils, forest machinery, propulsion, Republic of Sakha (Yakutia), permafrost, soil protection, tracked propulsion.

Введение. Лесозаготовительная промышленность является одной из перспективных отраслей экономики Республики Саха (Якутия). Однако интенсивное использование тяжёлой лесной техники (харвестеров, форвардеров, трелёвочных тракторов) приводит к серьёзной деградации почвогрунтов. Особую остроту проблема приобретает в условиях криолитозоны, где почвенный покров крайне чувствителен к механическим нагрузкам [1, 2]. Нарушение растительного и почвенного слоя активизирует термокарст, эрозию, снижает продуктивность лесных земель и затрудняет лесовосстановление [3-6].

В Якутии лесозаготовки ведутся преимущественно в зимний период, поскольку летние рубки на слабых мерзлотных грунтах запрещены нормативными документами (Приказ Минприроды № 367). Однако отдельные предприятия пытаются проводить работы в летний период в нарушение требований, что наносит катастрофический ущерб почвам. Существующие методики защиты почвогрунтов, разработанные для средней полосы России, не оптимальны для условий многолетней мерзлоты [7-9]. Поэтому необходимы специальные исследования и рекомендации, учитывающие местные климатические и почвенно-грунтовые особенности. Полученные рекомендации могут быть использованы лесозаготовительными предприятиями Якутии для снижения ущерба почвам и повышения устойчивости лесных экосистем. Целью работы является разработка практических рекомендаций по снижению негативного воздействия лесных машин на почвогрунты Якутии.

Материалы и методы исследования. Материалы данной статьи получены путем анализа литературных источников, полевых наблюдений на лесосеках Якутии, теоретического сравнения типов движителей и расчёта давления на почвогрунт.

Результаты.

1. Анализ воздействия лесных машин на почвогрунты.

Типы движителей лесных машин и их характеристики. Современные лесные машины (харвестеры, форвардеры, трелёвочные тракторы) оснащаются движителями двух основных типов – колёсными и гусеничными [10]. От типа движителя напрямую зависит величина давления на почву, глубина колеи, а также возможность работы в различных сезонных условиях [11]. Для территории

Республики Саха (Якутия) с её суровым климатом и широким распространением многолетнемёрзлых грунтов выбор типа движителя становится ключевым фактором сохранения почвенного покрова.

Колёсные движители используются на большинстве импортных харвестеров (John Deere, Komatsu, Ponsse) и форвардеров. Давление на почвогрунт у стандартных лесных шин (например, размером 600/55–26,5) при полной нагрузке на колесо обычно составляет от 120 до 180 кПа [11, 12]. Это довольно высокий показатель, особенно для влажных и переувлажнённых почвогрунтов. Величина давления зависит от массы машины, распределения нагрузки по осям, ширины шины и площади пятна контакта. Чем шире шина и больше её диаметр, тем больше площадь контакта и тем ниже давление на почвогрунт.

Преимущества колёсных движителей: Развивают скорость– до 25–30 км/ч на лесных дорогах. Хорошая манёвренность, особенно у шарнирно-сочленённых машин [13, 14]. Меньшее уплотнение глубоких слоёв почвогрунта по сравнению с гусеницами при движении по сухим твёрдым грунтам.

Недостатки: На влажных и слабых грунтах образуется глубокая колея – до 0,5–0,7 м за несколько проходов. При движении происходит боковой сдвиг почвы и её выпирание, особенно на глинистых и торфянистых почвогрунтах [15].

В условиях якутской весны, когда верхний слой оттаивает, а внизу сохраняется мёрзлый горизонт, колёсные машины часто застревают из-за низкого сцепления и «эффекта смазки» на границе талого и мёрзлого слоя [16-18].

Для снижения давления на почвогрунт производители предлагают шины низкого давления (Low Pressure) и сверхнизкого давления (Super Low Pressure). Например, шины шириной 800–900 мм при том же весе машины создают давление от 40 до 80 кПа. Некоторые модели (Michelin Forest, Nokian Forest King) способны работать при давлении 20–30 кПа, однако на твёрдых почвогрунтах такие шины имеют повышенное сопротивление качению и быстрее изнашиваются [9, 20].

Гусеничные движители традиционно устанавливаются на отечественных трелёвочных тракторах (ТТ-4, Онежец-300), а также на некоторых моделях импортных форвардеров, предназначенных для работы на слабых почвогрунтах. Гусеница обеспечивает значительно большую опорную площадь по сравнению с колёсами, поэтому удельное давление на почвогрунт существенно ниже [21-24].

Для стальных гусениц стандартной ширины (400–500 мм) давление составляет от 45 до 70 кПа [34]. Это в два-три раза меньше, чем у колёсных машин. Благодаря этому гусеничные тракторы могут работать на заболоченных участках и торфяниках, где колёсная техника практически не проходит [25].

Широкие гусеницы (ширина 600–900 мм) позволяют снизить давление до 25–40 кПа. Такие гусеницы применяются на некоторых модификациях тракторов ТТ-4М, а также на специализированных болотоходных машинах [6-28]. В Якутии

использование широких гусениц необходимо для работы в зимний период, а также для передвижения по технологическим покрытиям в случае вынужденных работ в переходные периоды (что крайне нежелательно).

Резино-армированные гусеницы – современный тип движителя (рисунок 1), который сочетает низкое давление (25–40 кПа) с меньшей массой (легче стальных на 20–30%) и более щадящим воздействием на верхний почвенный слой [29-31]. Однако их недостаток – низкая морозостойкость. При температуре ниже -35° Цельсия резина теряет эластичность, становится хрупкой и быстро разрушается. Поэтому в условиях якутской зимы (где температуры часто опускаются ниже -40°) резино-армированные гусеницы малопригодны для длительной эксплуатации.



Рис.1. Харвестер John Deere 2154D с резино-армированными гусеницами

Преимущества гусеничных движителей: Низкое давление на почвогрунт – основное преимущество для работы на слабых грунтах. Высокая проходимость, особенно при движении по снегу, болоту, мокрым лугам. Устойчивость на склонах и при поперечных уклонах [32-34].

Недостатки: Большая масса (обычно 15–22 т), что при многократных проходах уплотняет глубокие горизонты. Низкая скорость (до 10–12 км/ч), что снижает производительность на дальних расстояниях. Значительное разрушение

дёрна и растительного покрова при поворотах – гусеницы срезают верхний слой, обнажая минеральный грунт [35].

Таблица 1. **Сравнение типов движителей для лесных машин в условиях Якутии**

Тип движителя	Ширина профиля, мм	Давление на почвогрунт, кПа	Максимальная скорость, км/ч	Проходимость по торфяникам	Пригодность для зимы (ниже –35°C)	Пригодность для лета на суглинках
Колёса стандартные	600	120–180	25	Низкая	Хорошая (шины не дубеют)	Низкая (глубокая колея)
Шины низкого давления	800–900	40–80	20	Средняя	Удовлетворительная (до –40°C)	Средняя (требуется осторожность)
Гусеницы стальные узкие	400–500	45–70	12	Средняя	Отличная	Средняя
Гусеницы стальные	600–900	25–40	10	Хорошая	Отличная	Хорошая
Резино-армированные	500–700	25–40	15	Хорошая	Плохая (резина хрупкая)	Хорошая

Сравнительный анализ для условий Якутии. Для выбора оптимального движителя в якутских условиях необходимо учитывать сезонность работ и тип почвогрунтов. В таблице 1 приведены основные характеристики движителей применительно к региону. Из таблицы 1 видно, что для зимнего периода (который в Якутии длится 6–8 месяцев) оптимальны стальные широкие гусеницы – они выдерживают низкие температуры и обеспечивают минимальное давление. Летние рубки на суглинистых, глеевых и торфянистых почвах запрещены. Исключение составляют песчаные почвы (например, террасы рек в Алданском районе), где допускаются ограниченные рубки с обязательным применением шин сверхнизкого давления (SLP) и технологических покрытий [36]. При этом глубина колеи не должна превышать 10 см, а давление на почвогрунт – не более 40 кПа. В зимний период оптимальны стальные широкие гусеницы.

Механизмы и параметры негативного воздействия на почву

Воздействие движителя на почву не сводится только к образованию колеи. В реальных условиях происходят три взаимосвязанных процесса: уплотнение, сдвиг и разрушение структурных связей, а также нарушение растительного покрова [37-

41]. Каждый из этих процессов по-своему влияет на плодородие и устойчивость лесных почвогрунтов.

Уплотнение – это уменьшение объёма пор в почве под действием нормального давления от движителя. В естественном состоянии лесные почвы имеют высокую пористость (60–70%), что обеспечивает хорошую аэрацию, водопроницаемость и развитие корневых систем. При проезде машины поры сжимаются, плотность сложения возрастает [42, 43].

Количественно уплотнение оценивается через увеличение плотности: в нормальном состоянии для суглинистых лесных почв характерна плотность около 0,8–1,0 грамма на см^3, после многократных проходов тяжёлой техники она может возрасти до 1,4–1,6 грамма на см^3 [3]. Пористость при этом падает с 60–70% до 30–40% [44].

Последствия уплотнения почвогрунта для леса: Затрудняется проникновение влаги в глубокие слои – вода стекает по поверхности, усиливается эрозия [45]. Ухудшается газообмен в корнеобитаемом слое, корни испытывают кислородное голодание. Возрастает механическое сопротивление почвы, что мешает росту тонких всасывающих корней. Снижается активность почвенных микроорганизмов и дождевых червей, замедляя разложение органики.

В условиях Якутии, где корнеобитаемый слой лиственницы (основной лесообразующей породы) обычно не превышает 30–40 см, уплотнение именно этого горизонта наиболее опасно [1]. Даже при сохранении надземной части деревьев нарушение корневого питания ведёт к ослаблению насаждений, снижению прироста и повышенной подверженности болезням и вредителям.

При движении колеса или гусеницы возникает не только вертикальное, но и горизонтальное (касательное) напряжение. Оно срезает верхний слой почвы и отодвигает его в стороны. Это явление называется сдвигом или выдавливанием [46-48]. Глубина колеи при этом складывается из двух составляющих: осадка от сжатия и выпор от сдвига. На слабых переувлажнённых грунтах выпор может давать до половины и более общей глубины колеи [49].

Как это выглядит на практике: после проезда трактора по мокрому лугу или торфянику по краям колеи образуются валы вытесненной почвы высотой до 20–30 см. Растительный покров на этих валах полностью уничтожается, а сами валы со временем размываются дождями.

Факторы, усиливающие сдвиг: Высокая влажность почвогрунта (близкая к полному водонасыщению). Наличие гладких поверхностей (например, ледяной прослойки) на границе сезонно-талого и мёрзлого слоёв. Повороты техники на месте – при повороте гусеничного трактора касательные напряжения возрастают в полтора-два раза по сравнению с прямолинейным движением.

Для Якутии критическим периодом с точки зрения сдвига является весенний (апрель – первая половина мая), когда верхний слой почвы оттаивает на 10–30 см и насыщается водой, а ниже сохраняется мёрзлый водоупор [2]. Движитель легко погружается в этот влажный слой, и машина в считанные минуты уходит в грунт по ступицы.

Лесные почвы криолитозоны имеют очень тонкий, но чрезвычайно важный гумусовый горизонт – всего 3–10 см. Сверху он часто прикрыт мохово-лишайниковым покровом, который выполняет роль теплоизолятора: летом он предохраняет мёрзлую толщу от излишнего прогрева, зимой – от чрезмерного выхолаживания. Кроме того, моховой покров накапливает влагу и создаёт микроклимат для семенного возобновления.

При проезде лесной машины происходит следующее: гусеницы или колёса сдирают мохово-лишайниковый покров вместе с верхним слоем подстилки. Обнажается минеральный грунт, который имеет более тёмную окраску и сильнее нагревается на солнце. Повышается температура деятельного слоя, начинается активное оттаивание подстилающих льдистых горизонтов. Развиваются термокарстовые просадки – грунт оседает, образуются воронки и западины.

Восстановление разрушенного покрова на Севере происходит очень медленно. Моховой слой нарастает со скоростью 1–3 мм в год, поэтому для полного восстановления требуется 15–25 лет [2]. На участках с глубокой колеёй и полным уничтожением органогенного горизонта процесс может затянуться на 50 лет и более. За это время территория практически выпадает из лесного фонда – на ней сначала поселяются пионерные растения (кипрей, злаки, ивы), а затем, после накопления органики, может начаться естественное лесовозобновление.

Факторы, определяющие глубину и площадь деформации. Все факторы, влияющие на степень повреждения почв, можно разделить на три группы: природные (не зависят от человека), конструктивные (заложены в машине) и эксплуатационные (определяются организацией работ) [6].

Влажность почвогрунта – самый значимый фактор. Сухой почвогрунт выдерживает большие нагрузки без заметной деформации. При увеличении влажности выше предела текучести (для суглинков это 25–30% влажности, для торфов – 80–90%) почвогрунт ведёт себя как вязкая жидкость [37, 50]. В Якутии переувлажнение характерно для пойм рек, долин ручьёв, термокарстовых котловин и участков с близким залеганием льда. Летом после дождей даже относительно прочные суглинки становятся вязкими и пластичными.

Температура почвогрунта – в отрицательном диапазоне лёд выступает в роли цемента, связывая твёрдые частицы. Прочность мёрзлого почвогрунта в 5–10 раз выше, чем талого [2, 51, 52]. Однако при температурах от 0 до -5° Цельсия и содержании незамёрзшей воды более 30% почвогрунт сохраняет пластичность и

легко деформируется. В Якутии такой переходный период характерен для октября (промерзание сверху) и апреля–мая (оттаивание сверху).

Гранулометрический состав – песчаные почвы уплотняются относительно мало, однако при движении по влажному песку колея образуется за счёт вытеснения частиц; глинистые и суглинистые почвы сильно набухают и прилипают к движителю, увеличивая сопротивление; торф имеет очень низкую несущую способность – от 5 до 15 кПа, то есть даже человек весом 80 кг при площади подошвы обуви 0,02 м² создаёт давление 40 кПа, что уже на пределе для торфа.

Мощность органогенного слоя – чем толще торф или лесная подстилка, тем больше деформация при проезде. На марях (заболоченных лиственничных редколесьях) мощность торфа может достигать 1–3 м [53]. В таких местах даже специальная болотоходная техника без технологических настилов не проходит – колея может достигать глубины более метра.

Удельное давление на почвогрунт – главный параметр, который можно регулировать при проектировании машины или при её модернизации. Снижение давления со 100 до 40 кПа уменьшает глубину колеи примерно в 2–3 раза [5]. Именно поэтому все современные методы защиты почв основаны на уменьшении давления.

Соотношение длины опорной поверхности к ширине – у гусеничных машин длиннобазовые тракторы (с большим расстоянием между ведущим и направляющим колёсами) создают более равномерное распределение давления и дают меньшую глубину колеи, чем короткобазовые [52, 54].

Тип подвески – независимая подвеска колёс позволяет каждому колесу адаптироваться к неровностям, снижая пиковые нагрузки на отдельные участки. Для гусеничных машин важна конструкция опорных катков – чем их больше, тем равномернее распределение нагрузки [55-58].

Кратность проходов – обычно, первый проход уплотняет почвогрунт сильнее всего. Второй проход углубляет колею ещё на 20–40%, третий – ещё на 10–20% [59]. После пяти-шести проходов часто наступает «предел уплотнения» – дальнейшее движение по той же колее почти не увеличивает её глубину, но расширяет зону бокового выпора. Отсюда вытекает правило: лучше сделать два прохода по одному волоку, чем по два волока по одному проходу – общая площадь повреждённой почвы будет меньше.

Скорость движения – при очень низких скоростях (менее 3 км/ч) преобладает процесс сжатия, при высоких (более 10 км/ч) – сдвиг и выпотевание. Для слабых почвогрунтов оптимальной считается скорость 4–6 км/ч. В Якутии на зимних дорогах иногда развивают скорость до 20 км/ч, но на лесосеке следует двигаться медленно.

Режим поворота – самый опасный для почвы элемент движения. Поворот на месте (с остановкой одной гусеницы или с блокировкой одного борта) срезает растительный покров и грунт на глубину до 15–20 см. Для снижения ущерба необходимо проектировать волока без крутых поворотов – минимальный радиус поворота рекомендуется не менее 10–15 м, а лучше 20–25 м. Вместо поворота на 90° лучше сделать петлю или разворот через специальную площадку.

Климатические условия Республики Саха (Якутия) как особый фактор. Республика Саха (Якутия) – регион с экстремально-континентальным климатом. Особенности климата напрямую определяют не только режим лесозаготовок, но и степень уязвимости почвогрунтов [60].

Средняя температура января на юге Якутии составляет около -28° Цельсия, в центральных районах – -35…–40°, а на северо-востоке (Оймякон, Верхоянск) – минус 48 градусов. Абсолютный минимум, зафиксированный в Оймяконе, достигает -67,7° [61]. Продолжительность периода с устойчивым снежным покровом – от 200 до 240 дн. Толщина снега колеблется от 30–40 см на открытых пространствах до 80–100 см в лесу и до 150 см в горных районах.

При температурах ниже -15° почвогрунт находится в твёрдомерзлом состоянии, его несущая способность высока – допустимое давление может достигать 200–300 кПа. Это означает, что даже стандартные колёсные машины зимой не оставляют глубоких следов.

При температурах ниже -40° стальные гусеницы становятся хрупкими (возрастает риск поломки траков), резина шин теряет эластичность (появляются трещины), а гидравлика требует специальных низкотемпературных масел [62].

Наиболее благоприятный зимний период для лесозаготовок с точки зрения сохранности почв – с середины декабря по конец марта, когда устанавливаются устойчивые морозы от -15 до -35°.

Казалось бы, в холодном регионе осадков должно быть много. На самом деле годовое количество осадков в центральной и южной Якутии составляет всего 200–300 мм – это меньше, чем в пустынях Средней Азии. Однако из-за низких температур испаряемость также очень низкая. Поэтому почвы постоянно переувлажнены [1]. Весной и в начале лета, когда тает снег, формируется мощный поверхностный сток. Верхний слой почвы (первые 20–50 см) насыщается водой до состояния «плывуна» – текучей массы с несущей способностью менее 10–20 кПа.

В связи с этим даже небольшое количество осадков в сочетании с низкой испаряемостью создаёт постоянное переувлажнение, особенно в пониженных элементах рельефа. Поэтому абсолютно сухих лесных участков в Якутии (за исключением песчаных террас) очень мало.

Около 90% территории Якутии занято многолетнемёрзлыми породами (ММП). Мощность ММП варьирует от 100–200 м на юге до 1500 м на севере.

Температура пород колеблется от -1 до -12°. Важной особенностью является наличие подземных льдов – они встречаются в виде линз, жил, сеток, а иногда и мощных пластов [2].

При разрушении растительного покрова и верхнего органогенного слоя тепловой баланс поверхности нарушается. Тёмный обнажённый минеральный грунт сильнее нагревается солнцем, тепло передаётся вглубь, и льдистые горизонты начинают оттаивать. Поскольку лёд при таянии переходит в воду, занимающую меньший объём, происходит просадка поверхности. Это явление называется термокарстом [3].

Последствия термокарста: Образуются провалы и воронки глубиной 1–3 м и диаметром до 10 м. Термокарстовые процессы могут продолжаться годами и десятилетиями, постепенно расширяя зону разрушения. Восстановление леса на таких участках практически невозможно – они превращаются в болота или открытые воды. Поэтому в районах распространения льдистых мерзлотных пород (большая часть Центральной и Западной Якутии) нарушать целостность растительного покрова при лесозаготовках особенно опасно.

Особенности почвогрунтов криолитозоны. Почвенный покров лесной зоны Якутии представлен в основном мерзлотными таёжными почвами (таблица 2). Их главная особенность – наличие близкого к поверхности мёрзлого горизонта, который служит водоупором и определяет водный и тепловой режим [1].

Палевые мерзлотные почвы формируются на суглинистых и супесчаных породах под лиственничными и сосновыми лесами. Имеют маломощный гумусовый горизонт (всего 3–7 см). В мёрзлом состоянии они довольно плотные и могут выдерживать давление до 200–300 кПа. В талом состоянии (летом) их несущая способность падает до 80–120 кПа, что всё ещё достаточно для движения гусеничной техники при осторожном подходе [53].

Глееватые и глеевые мерзлотные почвы характерны для понижений с избыточным увлажнением. Они имеют сизовато-серые или голубоватые оттенки, что указывает на восстановительные процессы (недостаток кислорода). В таких почвах много льда, а после оттаивания они превращаются в вязкую, липкую массу. Несущая способность летом не превышает 30–50 кПа – это означает, что даже гусеничный трактор будет оставлять колею глубиной 20–30 см.

Таблица 2. **Свойства основных почвогрунтов Якутии в талом состоянии (летом)**

Тип почвы	Плотность, г/см³	Естественная влажность, %	Несущая способность, кПа	Глубина колеи после 5 проходов гусеничной машины (давление 60 кПа), см	Восстановительная способность
Палевая на суглинке	1,3–1,5	25–35	80–120	15–20	Средняя (5–10 лет)
Глееватая на тяжёлом суглинке	1,2–1,4	40–55	30–50	25–35	Низкая (10–15 лет)
Торфянисто-глеевая	0,2–0,5	200–400	5–15	50–80	Очень низкая (>20 лет)
Песчаная	1,5–1,7	15–25	60–100	10–15	Высокая (3–5 лет, но с риском эрозии)

Торфянисто-глеевые почвы встречаются на участках с близким стоянием мерзлоты и застойным увлажнением – вдоль ручьёв, в западинах, на окраинах марей. Мощность торфяного слоя – от 20 до 100 см. Под торфом залегает льдистый суглинок. Несущая способность летом крайне низкая – 5–15 кПа. Проезд техники без специальных покрытий (лежнёвок, геоматов) приводит к полному разрушению торфяного слоя и образованию глубоких, до метра, промоин [53, 63].

Песчаные мерзлотные почвы – наиболее благоприятный тип для лесозаготовок. Они хорошо дренированы, быстро просыхают, не накапливают избыточную влагу. Даже летом их несущая способность составляет 60–100 кПа. В зимний период – ещё выше. Однако и у них есть недостаток: при нарушении растительного покрова песчаные почвы легко подвергаются ветровой эрозии (выдуванию). В Якутии, где часты сильные ветры, это может привести к образованию подвижных песков и дюн.

Важное примечание: в мёрзлом состоянии (при отрицательной температуре пород) все показатели несущей способности возрастают в 3–10 раз. Например, мёрзлый торф может выдерживать давление до 100–150 кПа. Поэтому зимнее лесопользование является экологически предпочтительным [2].

Для каждого типа почвогрунтов следует применять соответствующую технологию и тип движителя:

На палевых суглинках зимой можно работать любой техникой; летом – только гусеничной с давлением не более 50–60 кПа.

Глееватые почвы летом требуют применения широких гусениц или резино-армированных движителей с давлением ниже 40 кПа, а также устройства временных покрытий на наиболее слабых участках.

Торфянистые почвы летом не должны использоваться для движения техники без специальных настилов. Единственный приемлемый вариант – зимняя рубка по глубокому промёрзшему слою.

Песчаные почвы наименее чувствительны к давлению, но требуют сохранения растительного покрова для предотвращения эрозии.

Нормативно-правовые требования к охране земель при лесопользовании. В Российской Федерации действует несколько уровней нормативных актов, регулирующих защиту почв при лесозаготовках – от федеральных законов до ведомственных инструкций и региональных правил.

Федеральные законы:

- Лесной кодекс РФ (статья 61 «Охрана лесов от загрязнения и иного негативного воздействия») обязывает лесопользователей принимать меры по предотвращению повреждения почв, в том числе при проведении рубок. В статье 66 «Лесовосстановление» установлена обязанность проводить рекультивацию нарушенных земель.

- Земельный кодекс РФ (статья 13 «Охрана земель») запрещает порчу земель, загрязнение, захламление, а также требует восстановления плодородия на нарушенных участках. За нарушение этих требований предусмотрена административная и уголовная ответственность.

- Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (статья 77) устанавливает обязанность полного возмещения вреда, причинённого почвам как объекту охраны окружающей среды.

Ведомственные нормативные акты.

Приказ Минприроды России № 367 от 28.06.2017 «Об утверждении особенностей использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных в криолитозоне» – это ключевой документ для Якутии. Он предписывает: Ограничивать рубки в летний период на слабых грунтах (торфяниках, глееватых почвах). Применять технологические коридоры (волока) шириной не более установленных норм. Использовать машины с низким давлением на грунт – для гусеничных не более 50 кПа, для колёсных не более 80 кПа. Проводить рекультивацию волоков сразу после завершения рубок.

ГОСТ Р 56695-2015 «Заготовка древесины. Требования к охране почв и лесовосстановлению» устанавливает количественные нормативы: Площадь повреждённых почв (с колеёй глубже 10 см или полным разрушением подстилки) не должна превышать 15% от площади лесосеки на слабых почвогрунтах и 10% на прочных. Ширина магистральных волоков – не более 5–6 м, пасечных – не более 4

м. Расстояние между волоками – в зависимости от типа рубки. Санитарные правила в лесах (утверждены Приказом Минприроды № 480) требуют не допускать захламления лесосек порубочными остатками, которые могут ухудшить санитарное состояние почв.

Региональные нормативы Республики Саха (Якутия)

В 2019 г. Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства РС(Я) утвердило «Правила лесопользования в условиях криолитозоны» (действуют для всех арендаторов лесных участков на территории республики). Основные положения: Запрещены рубки на участках с мощностью торфяного слоя более 50 см без устройства технологических настилов (лежнёвок, геоматов) или применения специальной болотоходной техники. Перед началом рубки обязательно проводится почвенно-экологическое обследование: выделяются участки с разной несущей способностью, проектируются волока в обход наиболее уязвимых зон. В период активного снеготаяния и после него (обычно с 15 апреля по 15 июня) движение техники по лесосекам допускается только по специальным лежнёвым дорогам или при устойчивом минусе. Рекультивация нарушенных земель (планировка волоков, нанесение органики, посев трав) должна проводиться не позднее первого вегетационного сезона после рубки.

На практике соблюдение этих правил оставляет желать лучшего. Из-за удалённости лесосек, недостатка инспекторов и слабой системы штрафов многие предприятия нарушают требования. По данным проверок 2023–2024 гг., около 60% лесосек в Якутии имели повреждения почв, превышающие нормативы в два и более раза.

Недостатки существующей нормативной базы и необходимость её совершенствования. Нормы ГОСТ Р 56695-2015 разработаны для Европейской части России и не в полной мере учитывают специфику мерзлотных почв (например, отсутствует дифференциация по льдистости и температурному режиму). Региональные правила Якутии не имеют статуса закона и слабо подкреплены санкциями. Отсутствует система мониторинга фактического состояния почв после рубок – контрольные проверки проводятся редко и часто формально.

2. Анализ существующих способов защиты почвогрунтов

Технологические методы снижения воздействия. Технологические методы направлены на рациональную организацию лесосечных работ таким образом, чтобы минимизировать площадь и глубину повреждения почв. Они не требуют замены техники или дорогостоящих устройств, но предполагают грамотное планирование и дисциплину на лесосеке.

Основной принцип: все транспортные и технологические перемещения машин должны осуществляться по заранее спроектированной сети волоков. Один

волок шириной 5–6 м, по которому пройдёт машина 20 раз, наносит меньше экологического ущерба, чем два волока по 10 проходов каждый. Площадь повреждённой почвы в первом случае составит около 5–6 м умножить на длину волока, во втором – в два раза больше.

Зимняя заготовка – наиболее эффективный способ защиты почв в условиях криолитозоны. Когда почвогрунт проморожен на глубину более 0,5 м, его несущая способность возрастает в несколько раз. Снежный покров служит дополнительным амортизирующим слоем, снижая давление на поверхность.

Оптимальная толщина снежного покрова не менее 30 см. Температура воздуха не выше -10–15° Цельсия в течение минимум 7 дней перед рубкой (чтобы промерзание было устойчивым). Глубина промерзания почвогрунта – не менее 40 см для колёсной техники и 30 см для гусеничной.

При температурах ниже -40° работу следует прекращать из-за риска поломки техники (хрупкость металла, загустевание масел).

Чем тяжелее машина, тем больше давление на почвогрунт и глубина колеи. Даже при широких шинах или гусеницах предельный вес не должен превышать несущую способность почвогрунта. Для большинства талых грунтов Якутии (кроме песков) предельная нагрузка на ось не должна превышать 5–6 т, на гусеницу – 10–12 т.

В зимний период на суглинках форвардер можно загружать на полную паспортную грузоподъёмность. Использовать систему взвешивания на борту (опция на современных форвардерах), чтобы оператор видел текущую нагрузку [64].

Каждый поворот гусеничной машины на месте (с блокировкой одной гусеницы) срезает растительный покров на площади в несколько квадратных метров. Поворот колёсной машины при заблокированных колёсах (так называемый «сухой поворот») также оставляет глубокие следы.

Желательно проектировать волока с минимальным количеством поворотов. Вместо одного поворота на 90° лучше сделать два поворота на 45° с плавными дугами. Устраивать разворотные площадки в концах волоков, предварительно укрепив их. Использовать поворотный круг на гусеничных тракторах (если есть) для изменения направления без сдвига почвогрунта.

Конструктивные решения движителей. Конструктивные методы направлены на изменение самой машины – замену или модернизацию движителя, чтобы снизить давление на почвогрунт и уменьшить сдвиговые нагрузки. Эти методы часто требуют значительных капиталовложений, но дают долгосрочный эффект.

Шины сверхнизкого давления имеют размеры от 800 мм и более по ширине при большом диаметре (1300–1600 мм). Они способны работать при внутреннем

давлении воздуха 20–30 кПа, а в некоторых конструкциях – всего 10–15 кПа. Площадь контакта такой шины с грунтом в 3–5 раз больше, чем у стандартной лесной шины. Примеры моделей: Nokian Forest King (ширина 900 мм, давление от 20 кПа). Michelin Forest (ширина 850 мм, давление от 25 кПа). Mitas SPT-2 (ширина 1000 мм, давление от 30 кПа).

Система централизованной подкачки шин позволяет оператору изменять давление в шинах прямо из кабины, не останавливая машину. На твёрдых почвогрунтах давление повышают до 100–120 кПа для улучшения управляемости и снижения расхода топлива. На слабых почвогрунтах давление снижают до 20–40 кПа, увеличивая пятно контакта и проходимость [64].

Преимущества: гибкость, возможность адаптироваться к любому типу почвогрунта без остановки. Недостатки: сложность системы, дополнительный вес, необходимость в герметичных шинах и компрессоре.

Для Якутии CTIS особенно полезна при переходе с зимних дорог (высокое давление) на лесосеку (низкое давление). Некоторые современные харвестеры (John Deere, Komatsu) уже оснащаются такой системой в заводской комплектации.

Широкие гусеницы – наиболее проверенный способ защиты почв в условиях Севера. Они могут быть двух типов: стальные (традиционные) и резино-армированные. Стальные широкие гусеницы устанавливаются на трелёвочные тракторы ТТ-4М, ТДТ-55А, а также на импортные форвардеры.

При ширине гусеницы 700 мм и длине опорной поверхности 2,5 м площадь контакта составляет 1,75 м^2. При массе машины 16 т давление на почвогрунт равно 16 т / (2 гусеницы * 1,75 м²) ≈ 4,6 т/м², или около 46 кПа. Это в два раза ниже, чем у стандартной узкой гусеницы.

Применение в Якутии: стальные широкие гусеницы идеально подходят для зимы (выдерживают любые морозы) и для лета на суглинистых почвах. На торфяниках даже широкие гусеницы оставляют колею, поэтому там требуются дополнительные меры.

Резино-армированные гусеницы представляют собой ленту из резины со стальными кордами внутри. Они легче стальных на 20–30%, обеспечивают более плавный ход, меньше вибрируют и практически не повреждают верхний слой почвы (резина не срезает дёрн так агрессивно, как стальной трак).

Ограничения: низкая морозостойкость (теряют эластичность ниже –35 °С) и более высокая цена (в 1,5–2 раза дороже стальных). Кроме того, они быстрее изнашиваются при работе на каменистых грунтах.

Для Якутии резино-армированные гусеницы рекомендуются для ограниченного использования – например, для летних лесных работ на песчаных почвах или в районах с не очень суровой зимой (южные улусы). На севере и в центральной Якутии зимой они непригодны.

Сдвоенные колёса – это установка двух шин на один диск или двух дисков рядом на одной оси. Это увеличивает площадь контакта на 40–60% без замены шин. Применяются на колёсных форвардерах и харвестерах при работе на очень слабых грунтах.

Недостатки: Ухудшается манёвренность (машина становится шире на 30–50 см). Повышается сопротивление качению, растёт расход топлива. Затруднён проход по узким волокам.

В Якутии сдвоенные колёса иногда устанавливают на форвардеры John Deere, работающие в Алданском районе на песчаных почвах. На суглинках и торфяниках они не дают значительного выигрыша, так как проблема не только в давлении, но и в сдвиге.

Применение временных технологических покрытий. Когда прочность почвогрунта настолько низка, что даже самая совершенная техника оставляет глубокую колею, прибегают к устройству временных покрытий. Они распределяют нагрузку на большую площадь и предотвращают контакт движителя с почвогрунтом. Самый старый и проверенный способ – укладка поперёк волока брёвен диаметром 16–24 см, вплотную друг к другу или с небольшими зазорами. Сверху можно насыпать слой щепы или песка для выравнивания [65, 66].

Преимущества: используется дешёвый местный материал – обычно низкокачественная древесина (дровяная, мелкая, кривая), которую невозможно использовать в промышленности. Недостатки: лежнёвки быстро разрушаются – после 50–100 проходов брёвна ломаются и уходят в грязь. Требуется постоянный ремонт. В Якутии лежнёвки широко применяются на лесосеках в пойменных и заболоченных местах. После завершения рубки лежнёвки, как правило, оставляют на месте – они постепенно перегнивают, возвращая органику в почву.

Современные материалы из полимеров (полипропилен, полиэтилен) представляют собой объёмные решётки или маты, которые укладываются на слабый почвогрунт и засыпаются песком, гравием или щебнем. Они выдерживают многократные проезды тяжёлой техники и могут использоваться повторно [67-70].

Преимущества: высокая несущая способность (до 200 т/м²), долговечность (до 10 лет), возможность демонтажа и перемещения на новую лесосеку. Недостатки: высокая стоимость – от 500 до 1500 рублей за квадратный метр.

Для Якутии целесообразно приобрести несколько комплектов геоматов (например, 5000 м²) для многократного использования на самых проблемных участках. За 3–5 лет они окупаются за счёт экономии на рекультивации и лежнёвках.

Пластиковые плиты размером 2×1 метр и толщиной 30–50 мм соединяются замками в единое полотно. Они очень прочны (выдерживают нагрузку до 100 тонн),

не гниют, не впитывают воду. После использования плиты моют, складывают и перевозят на новое место.

Применение в Якутии: идеально для перехода через ручьи, обводнённые низины, торфяники. На крупных лесозаготовках (с годовым объёмом более 100 тысяч кубометров) создание парка таких плит быстро окупается.

Сезонные ограничения и режимы работы. Организационные меры, связанные с выбором времени года и даже времени суток для проведения лесосечных работ, могут быть не менее эффективны, чем дорогостоящая техника.

«Окна прочности» для разных типов почвогрунтов, под которыми понимается период, когда грунт имеет максимальную несущую способность при минимальном вреде для растительности. Для различных почв Якутии эти окна различаются:

Песчаные почвы: наиболее прочны в сухой период (июль–август), когда влажность минимальна. Зимой также хороши, но при глубине промерзания более 50 см возможен отрыв мёрзлого слоя.

Суглинистые (палевые) почвы: оптимальны только зимой (декабрь–март). Весной, летом и в начале осени (апрель–октябрь) любые рубки на таких почвах запрещены. Торфянистые и глеевые почвы: единственное допустимое окно – устойчивая зима с промерзанием торфа не менее 50 см. Летом даже лёгкая техника не должна допускаться на эти грунты.

Торфянистые и глеевые почвы: единственное окно – устойчивая зима с промерзанием торфа на глубину не менее 50 см. Летом даже лёгкая техника оставляет глубокую колею.

Рекомендация для лесопользователей: разработать календарный план рубок с привязкой к типам почв на арендуемых участках. Для этого достаточно иметь почвенную карту и данные о среднемесячных температурах.

В Якутии выделяются три критических периода, когда любая техника наносит максимальный вред:

Весенний (15 апреля – 15 июня) – снеготаяние, переувлажнение верхнего слоя, оттаивание на 10–30 см при сохранении мёрзлого водоупора. Даже один проезд по волоку приводит к глубокой колее (до 50–70 см) и полному уничтожению растительного покрова. В этот период следует полностью прекращать лесозаготовки на всех типах почв, кроме скальных [71].

Осенний (1 октября – 15 ноября) – чередование оттепелей и заморозков, верхний слой то промерзает, то оттаивает, образуя «кашу». Меньше вреда, чем весной, но всё же значительный. В этот период допустимы только работы на песках и скальных грунтах [71].

Сильные морозы (ниже –40…–45°С) также относятся к критическим периодам, хотя и по другой причине. При экстремально низких температурах,

которые в Якутии держатся по 2–3 недели в декабре–январе и могут опускаться до –55…–60°С, работа лесных машин становится либо невозможной, либо крайне опасной для техники и персонала. Стальные детали ходовой части (траки гусениц, пальцы, оси) становятся хрупкими – при ударе о мёрзлый почвогрунт или пень они могут лопнуть. Резина шин и резино-армированных гусениц дубеет, теряет эластичность, на ней появляются трещины, которые быстро разрастаются. Гидравлические жидкости и моторные масла густеют, давление в системе падает, насосы работают с перегрузкой. Кабины машин даже с мощными отопителями не успевают прогреваться, стёкла запотевают и обмерзают, что резко ухудшает обзор. Работа операторов при таких температурах сопряжена с риском обморожений (даже в тёплой одежде). Поэтому большинство лесозаготовительных предприятий Якутии в период «крещенских морозов» (обычно с середины декабря по конец января при температурах ниже –40°С) полностью останавливают работы или переводят их на светлое время суток при кратковременных потеплениях до –35°С. Планировать рубки на этот период нецелесообразно – лучше использовать его для ремонта техники в отапливаемых боксах.

В период оттепелей (например, в марте, когда днём плюс, а ночью минус) движение техники следует планировать на утренние часы, когда почвогрунт ещё мёрзлый. Опытные операторы в Якутии выезжают на лесосеку в 4–5 утра, заканчивают работы к 10–11 часам, когда верхний слой начинает оттаивать.

Аналогично в октябре: лучше работать ночью и ранним утром, когда почвогрунт подмерзает. Это не требует дополнительных затрат, но даёт существенный экологический эффект.

Опыт лесопользования в Якутии и проблемы деградации почвогрунтов. Анализ реальной практики лесозаготовок в Республике Саха позволяет выявить основные источники проблем и оценить масштаб уже нанесённого ущерба.

По данным проверок Управления Россельхознадзора и Минэкологии Якутии за 2021–2024 гг., наиболее частые нарушения:

- Рубка в весенний период – зафиксирована на 35% лесосек (хотя по правилам она запрещена). Колея глубиной 40–60 см, полное уничтожение подстилки на 15–25% площади;
- Превышение ширины волоков – фактические волока часто в 2–3 раза шире нормативных (до 12–15 м вместо 5–6 м). Это происходит из-за того, что операторы «разъезжаются», чтобы объехать грязь, и расширяют зону повреждения;
- Отсутствие лежнёвок на переувлажнённых участках – хотя в проекте лесосеки они предусмотрены, на практике арендаторы их не устраивают, экономя время и материал;

- Использование колёсной техники на суглинках летом – приводит к глубокой колее и застреванию, а затем к многократным попыткам выбраться, которые ещё больше разрушают почву.

Экологические последствия: на обследованных участках (Алданский, Ленский, Хангаласский улусы) площадь деградированных почв, требующих рекультивации, составила от 8 до 27% от площади лесосек. Средний показатель – 17%, что превышает допустимый норматив (15%) в ряде случаев в 1,5–2 раза [82].

Было проведено сравнение участков, где применялась разная техника (данные за 2023 г. по Ленскому лесничеству):

1. Участок А (ТТ-4 с узкими гусеницами, 400 мм, летняя рубка на суглинках): глубина колеи – 35–50 см, площадь повреждений – 22 %, восстановление (появление всходов) через 2 года – только 5% нарушенной площади.

2. Участок Б (харвестер John Deere на шинах низкого давления, зимняя рубка): глубина колеи – 5–10 см, площадь повреждений – 6%, восстановление через 2 года – 60 % нарушенной площади.

3. Участок В (форвардер Ponsse на широких гусеницах 700 мм, летняя рубка на песке): глубина колеи – 8–12 см, площадь повреждений – 8 %, восстановление через 2 года – 50% (но есть риск ветровой эрозии, так как растительный покров нарушен).

Вывод: даже самая совершенная техника не компенсирует неправильный сезон. Лучшие результаты даёт сочетание зимней рубки и широких гусениц.

Главная причина, почему предприятия не внедряют почвозащитные технологии, – кажущееся удорожание работ. На самом деле, если посчитать полные затраты (включая рекультивацию, штрафы, потерю лесопродуктивности), то защита почвогрунтов оказывается выгодной. Однако бухгалтерия предприятия видит только прямые текущие расходы – покупку гусениц, устройство лежнёвок, простои из-за сезонных ограничений.

Барьеры: Высокая стоимость широких гусениц (до 2 млн руб. на трактор) и шин сверхнизкого давления. Отсутствие субсидий или налоговых льгот для экологически ответственных предприятий. Недостаток знаний у менеджмента – многие считают, что «зимой работать дороже из-за обогрева и освещения», не учитывая снижение износа техники и повреждений почв.

Целесообразно разработать региональную программу компенсации части затрат на приобретение широких гусениц и технологических покрытий (например, 30–50 % от стоимости). Это ускорит переход на экологичные технологии.

Зарубежный опыт (Скандинавия, Канада, Аляска). Страны с похожими природными условиями (холодный климат, наличие мерзлоты, слабые грунты)

накопили значительный опыт защиты почв, который может быть адаптирован для Якутии.

В скандинавских странах лесозаготовки ведутся в основном зимой (октябрь–апрель). Используются почти исключительно форвардеры на широких (600–800 мм) резино-армированных гусеницах или на колёсах сверхнизкого давления. Обязательна сертификация FSC или PEFC, требующая минимизации повреждений почв [73, 74].

Интересное решение: в Финляндии практикуется «плановая колейность» – специально устраивают волока с колеёй глубиной 20–30 см, которая служит дренажной системой и направлением для форвардера. При этом запрещено создавать колею глубже 30 см, так как она не зарастает годами.

Для Якутии скандинавский подход применим с корректировкой на более суровые морозы (необходимы стальные гусеницы, а не резиновые, зимой).

В провинциях Альберта, Британская Колумбия и Юкон (где также распространена вечная мерзлота) перед выдачей лицензии на рубку составляются карты несущей способности грунтов. Они создаются на основе аэрофотосъёмки и пробного бурения. Лесопользователь обязан придерживаться этих карт: на красных зонах (очень слабые грунты) рубка запрещена, на жёлтых – только зимой и только на гусеничной технике, на зелёных – без ограничений [71, 75].

Результат: повреждение почвгрунтов в Канаде составляет в среднем 5–7% от площади лесосеки (против 15–20% в России).

Для Якутии внедрение карт несущей способности – задача дорогая, но реальная. Можно начать с ключевых лесных районов (Алданский, Ленский, Усть-Майский) с использованием спутниковых данных и ограниченного полевого обследования.

На Аляске, климат которой ближе всего к якутскому, лесозаготовители используют снеголедяные дороги для проезда по болотистым участкам. Технология: зимой на слабых почвогрунтах намораживают слой льда (путём заливки воды и уплотнения снега) толщиной 30–50 см. По такой дороге может двигаться любая техника, не повреждая почву. Весной дорога тает, не оставляя следов.

Также на Аляске распространены шины сверхнизкого давления размером 66x43.00-25 (ширина около 1100 мм) с рабочим давлением 15–20 кПа. Они устанавливаются на форвардеры и позволяют работать летом на торфяниках без лежнёвок [71].

Для Якутии снеголедяные дороги могут быть эффективны на крупных лесосеках в районах с устойчивой зимой (большая часть республики). Однако для их создания нужны водоисточники и техника для полива (автоцистерны или мотопомпы).

3. Разработка практических рекомендаций для условий Якутии

Выбор оптимальных типов движителей для криолитозоны. На основе приведенного выше анализа, с учётом климатических, почвенных и эксплуатационных особенностей Республики Саха (Якутия), предлагается система выбора движителей в зависимости от сезона и типа почвогрунта. Главный принцип: зимой – любые гусеницы (лучше широкие стальные), летом – только специальные низкодавленные движители или гусеницы с давлением ниже 50 кПа, в межсезонье – только покрытия или остановка работ [5].

Рекомендации по типам движителей для разных сезонов:

Зимний период (декабрь–март, устойчивый мороз ниже –15 °С, промерзание почвогрунта > 0,5 м): для трелёвки – широкие стальные гусеницы (600–900 мм). Давление 30–50 кПа. Марки машин: ТТ-4М с уширенными гусеницами, а также импортные форвардеры на гусеничном ходу (Komatsu, Ponsse). Для валки и пакетирования (харвестеры) – если используются колёсные машины, то только на шинах низкого давления (800 мм) с системой подкачки, чтобы снижать давление до 50–60 кПа. Лучше применять гусеничные харвестеры (например, John Deere 909L с резиновыми гусеницами, но только при температурах выше –35 °С). При температурах ниже –40 °С работы не проводятся. Техника должна храниться в тёплых боксах или постоянно прогреваться.

Летний период (июль–август, почвогрунт талый, влажность умеренная на песках, высокая на суглинках и торфах). На песчаных почвах (террасы рек, Алданский район) допустимы колёсные машины на шинах низкого давления (60–80 кПа) или широкие гусеницы. Можно использовать стандартные шины, но с ограничением нагрузки. На суглинистых и глеевых почвах (большая часть Центральной Якутии) – только широкие гусеницы (стальные или резиновые) с давлением не более 50 кПа. Колёсные машины запрещены, так как оставляют глубокую колею. На торфяниках и марях – летние рубки не рекомендуются. Если они неизбежны, то только с применением технологических покрытий (лежнёвки, геоматы, пластиковые плиты) в сочетании с широкими гусеницами.

Переходные периоды (апрель–июнь, сентябрь–октябрь). В апреле–мае (снеготаяние, оттаивание верхнего слоя) – любые рубки запрещены. Допустимо только движение по лежнёвкам или снеголедяным дорогам. В сентябре–октябре (чередование заморозков и оттепелей) – возможна работа в утренние часы, когда грунт подморожен, но только на широких гусеницах и при обязательном контроле глубины колеи (не более 10 см).

Таблица 3. **Рекомендуемые движители по сезонам и почвогрунтам**

Тип грунта	Зима (t < –15°C)	Лето (талый)	Весна / осень (переувлажнён)
Пески	Любые, в т.ч. колёса стандартные	Только на шинах SLP (25–40 кПа) и с покрытиями	Только утром, гусеницы широкие
Суглинки палевые	Гусеницы широкие (40–50 кПа)	Запрещено	Запрещено
Глеватые (влажные)	Гусеницы широкие (30–40 кПа)	Запрещено	Запрещено
Торфяники	Гусеницы широкие (30 кПа) при промерзании > 0,5 м	Запрещено	Запрещено
Скальные выходы	Любые	Любые	Любые

Для лесозаготовительного предприятия с объёмом заготовки 150–200 тыс. м³/год замена стандартных гусениц (400 мм) на широкие (700 мм) на парке из 5 тракторов стоит около 8–10 млн рублей (с учётом монтажа).

Это даёт: Снижение расхода топлива на 5–8% за счёт меньшего сопротивления качению. Увеличение срока службы ходовой части на 30% (широкая гусеница меньше изнашивает опорные катки). Сокращение затрат на рекультивацию в 2–3 раза. Предотвращение штрафов за порчу земель (до 2 млн руб/год). Срок окупаемости – 2–3 года.

Обоснование допустимых нагрузок и давления на почвогрунт

Для практического применения необходимо определить, какое давление на почвогрунт можно считать безопасным для каждого типа почвогрунтов в разных состояниях (мёрзлое, талое, переувлажнённое). Поскольку точный расчёт требует сложных формул, для производственных нужд можно использовать упрощённые табличные значения, основанные на экспериментальных данных для Якутии [86].

На основе натурных испытаний, проведённых в Ленском и Алданском лесничествах (2021–2024 гг.), были определены следующие пороговые значения:

Для мёрзлых почвогрунтов (температура ниже –5 °С, глубина промерзания> 0,5 м): пески и супеси - до 150 кПа (стандартные колёса проходят без глубокой колеи); суглинки палевые - до 120 кПа; глееватые суглинки: до 80 кПа; торфяники мёрзлые - до 100 кПа (но при условии, что промерзание на всю мощность торфа).

Для песчаных талых почвогрунтов (исключение, лето): допустимое давление до 80 кПа. Для суглинистых, глеевых и торфянистых талых грунтов расчётные

значения приведены только для оценки, но фактическое движение техники на этих грунтах летом запрещено. Для переувлажнённых почвогрунтов любых типов – не более 20–30 кПа, однако в этот период (весна, осень) работы также запрещены, за исключением передвижения по снеголедяным дорогам.

Лесопользователю не обязательно проводить сложные расчёты. Достаточно использовать простой метод: отпечаток гусеницы или шины на грунте. Если отпечаток имеет чёткие края и глубина колеи после одного прохода не превышает 2–3 см – давление приемлемо. Если колея глубже 5 см – давление слишком высокое, необходимо снижать нагрузку или менять движитель [5].

Также можно использовать портативный измеритель твёрдости грунта (пенетрометр) – недорогой прибор, который показывает сопротивление пенетрации (кПа). Для лесных почв Якутии пороговые значения: > 150 кПа – твёрдый (можно работать любой техникой), 50–150 кПа – средней плотности (требуется осторожность), < 50 кПа – слабый (требуются спецмеры).

Допустимое давление для одного прохода может быть выше, чем для многократного. Например, на суглинке давление 80 кПа при первом проходе даёт колею 5–6 см, а после 10 проходов – уже 15–20 см. Поэтому для волоков, по которым техника ходит многократно (магистральные волока), нормативное давление следует снижать на 20–30 %. Для пасечных волоков (2–3 прохода) – можно оставлять как есть.

Рекомендация: на магистральных волоках Якутии применять давление не более 40 кПа, что достигается только широкими гусеницами. На пасечных волоках допустимо до 60 кПа [47].

Несмотря на высокую стоимость, современные резино-армированные гусеницы (Rubber tracks) и шины сверхнизкого давления (SLP) имеют значительные преимущества для летней работы на слабых грунтах. В Якутии их применение должно быть адаптировано к местным условиям.

Резино-армированные гусеницы: плюсы и минусы для Якутии.

Преимущества: Давление на грунт 20–35 кПа (самое низкое среди всех движителей); Отсутствие металлических траков – не срезают дёрн, моховой покров остаётся целым; Меньшая масса (на 500–800 кг на трактор) – снижает общее уплотнение; Лучшая амортизация – меньше вибрация, выше комфорт оператора.

Недостатки: Низкая морозостойкость – при –35 °С резина становится хрупкой. Это исключает их использование зимой в центральных и северных районах Якутии; Высокая цена – комплект на форвардер стоит 2–3 млн рублей, что в 1,5–2 раза дороже стальных гусениц; Быстрее изнашиваются при работе на каменистых грунтах (например, в горной части Алданского района).

Рекомендация: резино-армированные гусеницы целесообразно применять в зимний период в южных районах с температурой выше –35°С. В летний период их

использование на суглинистых и глеевых почвах запрещено. На песчаных почвах летом они допустимы, но предпочтительнее шины SLP.

Низкодавленные шины (SLP) – альтернатива для колёсной техники.

Для предприятий, которые не хотят переходить на гусеницы, существуют шины сверхнизкого давления (Super Low Pressure). Например, Nokian Forest King SLP, Michelin Forest SLP. Они имеют ширину 900–1100 мм и рабочее давление 15–30 кПа. Устанавливаются на стандартные колёсные форвардеры и харвестеры [77].

Применение в Якутии:

Летом на песках и суглинках – отлично. Глубина колеи – 5–10 см.

Зимой при температурах выше –30 °С – приемлемо, но сцепление со снежно-ледяной поверхностью хуже, чем у гусениц.

При температурах ниже –35 °С – не работают (резина дубеет). Поэтому в Якутии их использование зимой ограничено южными улусами с мягкими зимами (Ленский, Олёкминский).

Экономика: комплект из 8 шин (на 4 оси) стоит 4–5 млн рублей. Срок службы – 3000–4000 моточасов. Замена шин на парке из 3 машин окупается за 2–3 г. за счёт снижения простоев (машины реже застревают) и сокращения рекультивации.

Система централизованной подкачки (CTIS) как обязательное дополнение.

Для эффективного использования низкодавленных шин необходима система подкачки (Central Tire Inflation System). Она позволяет водителю изменять давление от 15 кПа (на слабом грунте) до 100 кПа (на твёрдой дороге) без остановки. Это снижает износ шин и расход топлива.

Для Якутии CTIS особенно полезна при переездах с лесовозной дороги (высокое давление) на лесосеку (низкое). Рекомендуется включать эту опцию при заказе новых машин или устанавливать послепродажно (стоимость – 300–500 тыс. руб. на машину).

Организация волоков и временных лесовозных дорог. Даже самая совершенная техника не спасёт почву, если волока и дороги спроектированы неправильно. Организация транспортной сети – ключевой элемент защиты почв.

Перед началом рубки необходимо: Изучить почвенную карту лесосеки (масштаб 1:10 000). Если её нет – провести экспресс-обследование (10–20 шурфов на 100 га). Нанести на план наиболее прочные участки (песчаные линзы, микроповышения, участки с глубоким промерзанием). Проложить магистральные волока именно по этим участкам, даже если это удлиняет путь на 10–20%. Обозначить зоны, запрещённые для движения (торфяники, ручьи, крутые склоны) [78].

Рекомендуемые параметры волоков для Якутии: Ширина магистрального волока – не более 6 м (для двустороннего движения). Ширина пасечного волока – не более 4 м. Расстояние между пасечными волоками – 35–50 м (чтобы площадь

между ними была достаточно большой для естественного возобновления). Радиус поворота – не менее 15 м (лучше 20–25 м).

На участках с торфянистыми и глеевыми почвами, где даже широкие гусеницы оставляют колею глубже 15 см, необходимо укладывать лежнёвки [79]. Технология: Использовать неликвидную древесину (диаметр 16–24 см, длина 4–6 м); Укладывать поперёк волока, вплотную друг к другу; При необходимости сверху насыпать слой песка или щепы (10–15 см) для выравнивания.

Для участков, где лесозаготовки планируются ежегодно (арендные участки с ротацией 20–30 лет), выгодно применять многоразовые покрытия:

Пластиковые дорожные плиты – соединяются замками, легко демонтируются. Цена – 2500 руб./м², срок службы до 20 лет. Идеальны для перехода через ручьи и болота.

Зимой, при устойчивых морозах ниже –15°С, можно создавать дороги из уплотнённого снега и льда. Технология: На расчищенном волоке уплотняют снег гусеничной машиной (3–4 прохода). Разбрасывают воду (из автоцистерны или мотопомпой из ближайшего водоёма) слоями по 1–2 см, замораживая каждый слой. Толщина ледяного покрытия – 10–20 см. После этого дорога выдерживает нагрузку до 50–60 т.

Преимущества: бесплатный материал (снег, вода), после таяния не остаётся следов. Недостатки: трудоёмкость, требуется источник воды.

Для Якутии, где морозы держатся 3–5 месяцев, снеголедяные дороги могут быть основным способом проезда по торфяникам и глеевым почвам. Рекомендуется включать эту технологию в планы зимних рубок.

В летний период движение техники по волокам на суглинистых, глеевых и торфянистых почвах запрещено. Если возникает острая необходимость проведения работ на песчаных почвах летом, то все волоки должны быть оборудованы геосинтетическими покрытиями или пластиковыми плитами, а давление в шинах снижено до 20–30 кПа.

4. Экономическая оценка предлагаемых мероприятий

Любые природоохранные мероприятия должны быть экономически обоснованы. Покажем на примере лесозаготовительного предприятия с объёмом заготовки 150 тыс. м³/год, что переход на почвозащитные технологии выгоден.

Исходные данные для расчёта. Предприятие «Якутлес» (условное) имеет парк техники: 3 трелёвочных трактора ТТ-4 с узкими гусеницами (400 мм) – базовый сценарий; 2 форвардера John Deere 1210E на стандартных шинах.

Ежегодно заготавливает 150 тыс. м³, из них 70% зимой, 30% летом. Площадь лесосек – 750 га в год. Повреждения почв по базовому сценарию: 18% площади (глубокая колея > 20 см). Затраты на рекультивацию (планировка, посев трав) – 20

тыс. руб./га нарушенных земель. Штрафы за порчу земель (среднегодовые) – 1,5 млн руб.

Проектный сценарий (внедрение рекомендаций). Мероприятия: Замена узких гусениц (400 мм) на широкие (700 мм) на всех 3 тракторах – 6 млн руб. единовременно. Установка шин низкого давления (800 мм) на 2 форвардера – 4 млн руб. Устройство лежнёвок на 2 км волоков ежегодно – 0,5 млн руб./год (материалы + работа). Переход на исключительно зимнюю заготовку. Летние рубки полностью исключаются, что соответствует требованиям законодательства. Обучение операторов и мониторинг – 0,3 млн руб./год.

Затраты проектного сценария: единовременные: 10 млн руб.; ежегодные: 0,5 + 0,3 = 0,8 млн руб.

Эффект: Снижение площади глубоких повреждений с 18% до 6% (в 3 раза). Рекультивация потребуется только на 6% от 750 га=45 га. Затраты на рекультивацию: 45 га × 20 тыс. руб. = 0,9 млн руб. (вместо 2,7 млн руб. в базовом сценарии). Экономия – 1,8 млн руб./год. Штрафы снижаются до 0,3 млн руб./год (за мелкие нарушения). Экономия – 1,2 млн руб./год.

Снижение расхода топлива (широкие гусеницы имеют меньшее сопротивление) – 3% экономии, или 0,8 млн руб./год.

Увеличение срока службы ходовой части (широкие гусеницы изнашиваются медленнее) – экономия на ремонте 0,5 млн руб./год.

Итого ежегодная экономия (выгода): 1,8 +1,2 +0,8 +0,5=4,3 млн руб.

Срок окупаемости и чистая приведённая стоимость

Единовременные затраты – 10 млн руб. Ежегодная чистая выгода (экономия минус дополнительные ежегодные затраты) = 4,3–0,8=3,5 млн руб.

Простой срок окупаемости = 10/3,5≈2,9 года.

С учётом дисконтирования (ставка 10%) срок окупаемости – около 3,5 лет. Это приемлемо для инвестиций в лесной сектор.

Вывод: мероприятия экономически эффективны и окупаются за 3–4 года. Для небольших предприятий можно начинать с частичного внедрения – например, заменить гусеницы только на 1–2 тракторах и использовать их на самых слабых участках.

5. Оценка экологической эффективности

Экологическая эффективность оценивается по трём группам показателей: сохранение почвенного покрова, восстановление растительности, предотвращение термокарста и эрозии.

Сохранение площади почвенного покрова. В базовом сценарии (узкие гусеницы, летние рубки) площадь глубокой колеи (> 20 см) составляет 18% от лесосеки. При проектном сценарии – 6%. То есть сохраняется нетронутыми дополнительные 12% площади, или 90 га в год на 750 га лесосек. На этой площади

сохраняется естественная структура почвы, не нарушается тепловой режим, что особенно важно в криолитозоне.

Восстановление растительности. По данным мониторинга (постпроектные наблюдения в Ленском лесничестве), на участках с колей до 10 см (проектный сценарий) подрост лиственницы и берёзы появляется уже через 2–3 года, а через 5–7 лет формируется сомкнутый молодняк. На участках с колей 20–30 см (базовый сценарий) возобновление задерживается на 10–15 лет, причём вместо ценных пород часто растут ива и ольха [78].

Количественно: проектный сценарий ускоряет лесовосстановление в среднем на 5–7 лет, что увеличивает оборот рубки и экономическую отдачу с гектара.

Предотвращение термокарста и эрозии. На участках с разрушенным растительным покровом в районах распространения льдистых мерзлотных пород (Центральная Якутия, Вилюйская группа улусов) активизируются термокарстовые процессы. За 5–10 лет могут образоваться провалы глубиной до 2 метров, которые полностью выводят землю из лесного фонда.

Проектный сценарий, сохраняя мохово-торфяной слой и минимизируя глубину колеи, снижает риск термокарста на 80–90%. Также уменьшается эрозия на песчаных почвах (ветровая) и на склонах (водная) [3].

Предотвращённый экологический ущерб можно оценить в денежном выражении – по таксам за уничтожение плодородного слоя. Для Якутии восстановление 1 га деградированных земель стоит от 50 до 150 тыс. руб. (в зависимости от степени). Проектный сценарий предотвращает деградацию примерно 90 га в год, что эквивалентно предотвращённому ущербу в 4,5–13,5 млн руб/год. Даже нижняя оценка (4,5 млн) превышает ежегодные затраты на мероприятия (0,8 млн) [79].

Для наглядности сведём основные показатели в таблицу 4.

Таблица 4. **Сравнение базового и проектного сценариев (на 750 га лесосек в год)**

Показатель	Базовый сценарий	Проектный сценарий	Изменение
Площадь глубокой колеи (>20 см), га	135	45	-90 га
Затраты на рекультивацию, млн руб./год	2,7	0,9	-1,8
Штрафы за порчу земель, млн руб./год	1,5	0,3	-1,2
Период естественного лесовосстановления, лет	10-15	3-5	-7 лет
Риск термокарста (доля участков)	30%	5%	-25 %
Предотвращённый ущерб почвам (расчётный), млн руб./год	-	4,5-13,5	-

Вывод: проектный сценарий обеспечивает значительный экологический эффект – снижение нарушенных площадей в 3 раза, ускорение лесовосстановления, предотвращение термокарста. При этом он экономически выгоден (окупаемость 3–4 года). Рекомендуется к внедрению на всех лесозаготовительных предприятиях Якутии, особенно в зоне распространения многолетней мерзлоты.

Внедрение этих рекомендаций на лесозаготовительных предприятиях Якутии позволит существенно снизить негативное воздействие на почвогрунты, сохранить продуктивность лесных земель и обеспечить устойчивое лесопользование в условиях криолитозоны.

Заключение. Были получены следующие основные результаты:

1. Выявлены ключевые факторы негативного воздействия лесных машин на почвогрунты Якутии. Основными механизмами являются: уплотнение (плотность возрастает с 0,8–1,0 до 1,4–1,6 г/см³, пористость падает с 60–70% до 30–40%), сдвиг и выдавливание грунта (образование валов высотой до 30 см), а также разрушение растительного покрова, ведущее к термокарсту и эрозии.

2. Установлено, что республика характеризуется резко континентальным климатом с длительной холодной зимой и коротким влажным летом, широким распространением многолетней мерзлоты (90% территории) и маломощного органогенного слоя. Преобладают переувлажнённые глинистые и торфянистые почвы с несущей способностью летом всего 5–15 кПа. Эти условия делают зимнее лесопользование (при устойчивых отрицательных температурах) экологически предпочтительным, а летние рубки намноголетне-мерзлотных почвах – запрещёнными.

3. Проанализированы технологические, конструктивные, применение технологических покрытий и организационные методы защиты почв. Установлено, что в Якутии они применяются недостаточно: большинство предприятий использует устаревшую технику с высоким давлением и не соблюдает сезонные ограничения, что приводит к деградации почв на 15–25% площади лесосек. Зарубежный опыт (Скандинавия, Канада, Аляска) показывает высокую эффективность широких гусениц, карт несущей способности и строгих сезонных «окон прочности».

4. Разработаны практические рекомендации для условий Якутии:

– лесозаготовки проводить только зимой при устойчивых морозах ниже –15°С до -35°С и промерзании грунта на более полметра;

– использовать широкие стальные гусеницы (600–900 мм, давление 30–50 кПа) и шины низкого давления;

– проектировать обустройство лесосеки по почвенным картам, рекомендуемая ширина магистральных волоков ≤6 м, пасечных ≤4 м, радиус поворота ≥15 м.

– использовать технологические покрытия правильно. Торфяники, глеевые почвы, высокие грунтовые воды → лежнёвки (единственное надёжное основание, где грунт не промерзает). Пески, суглинки (при устойчивом промерзании) → снеголедяные дороги (зимники) – быстро, дёшево и экологично. Проблемные участки для многоразового использования → геосинтетика или пластиковые плиты – окупается на арендных лесосеках.

5. На примере типичного предприятия (150 тыс. м³/год) показано, что переход на зимнюю заготовку, широкие гусеницы, шины низкого давления и правильное использование технологических покрытий позволяет:

– снизить площадь глубокой колеи с 18% до 6% (на 90 га в год);

– сократить ежегодные затраты на рекультивацию на 1,8 млн руб., штрафы – на 1,2 млн руб., расход топлива и ремонт – на 1,3 млн руб.;

– получить чистую ежегодную экономию 4,3 млн руб. при единовременных затратах 10 млн руб.;

– срок окупаемости – 2,9 года (с дисконтированием ~3,5 года).

Экологический эффект: ускорение лесовосстановления на 5–7 лет, снижение риска термокарста с 30% до 5%, предотвращённый ущерб почвам – от 4,5 до 13,5 млн руб./год.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные меры могут быть непосредственно использованы лесопромышленными предприятиями Республики Саха (Якутия) для снижения экологического ущерба при лесозаготовках. Внедрение этих рекомендаций позволит сохранить

продуктивность лесных земель, уменьшить затраты на лесовосстановление и рекультивацию, а также повысить устойчивость лесных экосистем в условиях криолитозоны.

Литература

1. Винокуров И.А. Мерзлотные почвы Якутии и их рациональное использование – Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН, 2017. – 186 с.

2. Павлов А.В. Криолитозона и лесное хозяйство – Новосибирск: Наука, 2021. – 224 с.

3. Сидоров А.А., Михайлова Е. П. Экология лесопользования в криолитозоне – Якутск: Издательство СВФУ, 2020. – 234 с.

4. Блашкевич О.Х., Горохова Н.Е., Назаров А.А., Должиков И.С., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Оценка лесовосстановления в Республике Саха (Якутия) // Вестник АГАТУ. 2024. № 4 (16). С. 67-137.

5. Рудов С.Е., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск, 2022. С. 38-41.

6. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 4 (40). С. 25-29.

7. Жуков В. А. Воздействие лесных машин на почву: теория и практика – Москва: Лесная промышленность, 2018. – 312 с.

8. Карасев А.П. Механизация лесозаготовок и экология – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2020. – 248 с.

9. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. 2020. С. 323-326.

10. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Мануковский А.Ю., Рудов С.Е., Востриков Д.С. Основа математических моделей взаимодействия колесных движителей лесных машин с поверхностями движения // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 173-184.

11. Бухтояров Л.Д., Абрамов В.В., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках // Resources and Technology. 2020. Т. 17. № 3. С. 1-35.

12. Шапиро В.Я., Савченко С.И., Григорьев И.В., Тихонов Е.А., Задраускайте Н.О., Калита А.Ю. Обоснование безопасного и устойчивого маневрирования колёсного движителя лесных машин в сложных геотехнических условиях работы // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 3 (67). С. 148-154.

13. Куницкая О.А., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Калита Г.А., Ревяко С.И., Тимохов Р.С. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 57-63.

14. Куницкая О.А., Должиков И.С., Сивцева Т.В., Степанищева М.В., Ревяко С.И., Калита О.Н. Динамика российского рынка лесных машин в XXI веке // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4 (64). С. 75-82.

15. Шапиро В.Я., Рыжов Я.А., Григорьев И.В., Тихонов Е.А., Алексеева А.В., Кривоконева Е.Ю. Особенности разрушения оттаивающего почвогрунта на склоне в боковых полосах трасс движения лесных машин // Системы. Методы. Технологии. 2026. № 1 (69). С. 129-136.

16. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Новиков М.С., Гурьев А.Ю., Дьяченко В.М. Геотехнические факторы лесосечных работ в условиях крайнего севера // Современные проблемы развития Европейского Севера - 2025. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ухта, 2025. С. 59-62.

17. Шапиро В.Я., Новиков М.С., Григорьев И.В., Перфильев П.Н., Тихонов Е.А., Друзьянова В.П. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учетом маневрирования движителя // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43. № 2. С. 77-84.

18. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Савченко С.И., Тихонов Е.А., Ревяко С.И., Перфильев П.Н. Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях // Лесотехнический журнал. 2025. Т. 15. № 3 (59). С. 228-244.

19. Зорин М.В., Петросян С.С., Куницкая О.А., Макуев В.А., Долматов Н.П., Григорьев И.В., Хитров Е.Г. Исследование максимальной оценки коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 239. С. 191-201.

20. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Ланских Ю.В., Перминов А.А. Технические решения для повышения срока службы шин автолесовозов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 5. С. 13-19.

21. Дьяченко В.М., Марков В.А., Гурьев А.Ю. Средощадящие гусеничные движители лесных машин для условий крайнего севера // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск, 2025. С. 133-137.

22. Карасев Ю.А., Дьяченко В.М., Марков В.А. Экологическое обоснование применения гусеничной техники в лесах криолитозоны // Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса. Материалы Всероссийской отраслевой научно-практической конференции, приуроченной к 95-летнему юбилею Кондопожского ЦБК. Санкт-Петербург, 2024. С. 103-107.

23. Карасёв Ю.А., Дьяченко В.М., Марков В.А., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Гурьев А.Ю. Особенности эксплуатации гусеничных лесных машин в криолитозоне и пути повышения ее эффективности // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 3 (15). С. 32-45.

24. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Взаимодействие гусеничного движителя с почвогрунтом при значительном продольном смещении центров давления // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. материалы научно-технической конференции. 2016. С. 124-127.

25. Карасев Ю.А., Марков В.А., Дмитриев А.С., Должиков И.С., Юдилевич А.М. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин // Resources and Technology. 2023. Т. 20. № 1. С. 42-86.

26. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Иванов В.А. Увеличение подвижности гусеничных вездеходов для вахтовых лесозаготовок // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 114-119.

27. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Квазибесступенчатые трансмиссии для лесных гусеничных машин // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 1. С. 68-77.

28. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 57-58.

29. Дьяченко В.М., Должиков И.С., Куницкая О.А., Марков В.А., Макуев В.А., Охлопкова М.К. Обоснование вида движителя лесной машины по критерию экологичности для условий крайнего севера // Resources and Technology. 2025. Т. 22. № 3. С. 1-62.

30. Дьяченко В.М., Марков В.А., Должиков И.С., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В., Новиков М.С. Теоретические предпосылки к снижению негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты районов крайнего севера // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 3 (21). С. 49-61.

31. Сибиряткин Е.В., Рыжов Я.А., Должиков И.С., Дьяченко В.М., Куницкая О.А. Современные технические и технологические решения для снижения

негативного воздействия движителей машин на лесные почвогрунты // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 6 (24). С. 44-53.

32. До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 18-27.

33. До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 3-12.

34. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78-84.

35. Гурьев А.Ю., Шапиро В.Я., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Дьяченко В.М. Влияние типа движителя трактора на уплотнение почвогрунта на склонах многолетней мерзлоты // Инженеры России и Беларуси: сила в сотрудничестве. Материалы Международной научно-практической конференции. Архангельск, 2024. С. 70-73.

36. Отчёт о производственной деятельности ООО «Алданлес» за 2023-2024 гг. – Алдан, 2024. – 87 с.

37. Петров Н. Н. Взаимодействие лесных машин с мерзлыми грунтами – Красноярск: СибГТУ, 2019. – 198 с.

38. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Stepanishcheva M. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. С. 339-344.

39. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding // International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. С. 501-508.

40. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Т. 16. № 4. С. 61-75.

41. Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Druzyanova V.P., Ivanov A.K., Okhlopkova M.K., Pankov V.Y., Pekhutov A.S., Ivanov A.P., Borovikov R.G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Т. 25. № Suppl. 2. С. 191-205.

42. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Modeling the effect of skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Defense Modeling and Simulation. 2020. С. 551-559.

43. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhih A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. Т. 17. № 4. С. 89-95.

44. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical studies of dynamic soil compaction by wheeled forestry machines // Diagnostyka. 2020. Т. 21. № 4. С. 3-13.

45. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Assessment the effect of skidding techniques on the ecological efficiency of the skidding tractor // Diagnostyka. 2020. Т. 21. № 3. С. 67-75.

46. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhih A., Kruchinin I., Shakirzyanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation // Diagnostyka. 2020. Т. 21. № 2. С. 95-109.

47. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки.2006. №1. С.174-180.

48. Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. №2. С. 94.

49. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 140-152.

50. Шапиро В.Я., Гурьев А.Ю., Каляшов В.А., Куницкая О.А. Влияние эффектов дилатансии и анизотропии свойств массива почвогрунта на глубину образования колеи на склоне // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 5 (17). С. 24-29.

51. Шапиро В.Я., Куницкая О.А., Каляшов В.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., Тихонов Е.А. Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. № 5 (407). С. 120-132.

52. Дьяченко В.М., Должиков И.С., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Барышникова Е.В., Анисимов Е.Е. Теоретическое обоснование тягово-сцепных

свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты // Resources and Technology. 2025. Т. 22. № 1. С. 1-41.

53. Классификация мерзлотных почв Якутии / Институт мерзлотоведения СО РАН. – Якутск, 2018. – 67 с.

54. Григорьев И. В. Влияние способа трелевки на эксплуатационную эффективность трелевочного трактора: дис. … канд. техн. наук - Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2000. -144 с.

55. Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Тамби А.А. Теоретическое обоснование параметров средощадящего движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 81-88.

56. Григорьев И.В., Чураков А.А., Григорьева О.И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // Транспортные и транспортно-технологические системы. материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 140-144.

57. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Оценка энергоэффективности шасси гусеничных лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы. материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 145-149.

58. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Газизов А.М. Пути улучшения управляемости лесных и транспортных гусеничных машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (43). С. 97-106.

59. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина – Москва: Машиностроение, 1973. – 520 с.

60. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101-117.

61. Атлас Республики Саха (Якутия) / ответственный редактор В. П. Соломонов. – Якутск: Издательство Академии наук РС(Я), 2019. – 320 с.

62. Григорьев И.В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. Главный редактор И.С. Сазонов. 2018. С. 102.

63. Сибиряткин Е.В., Рыжов Я.А., Должиков И.С., Дьяченко В.М., Куницкая О.А. Современные технические и технологические решения для снижения негативного воздействия движителей машин на лесные почвогрунты // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 6 (24). С. 44-53.

64. Григорьев И.В., Петров М.Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надёжности и энергоэффективности лесных машин // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 73-81.

65. 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. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, 2021. С. 278-285.

66. Григорьев И.В., Зорин М.В., Григорьев Г.В., Рудов С.Е., Швецова В.В., Калита Г.А. Анализ способов укрепления временных транспортных путей для трелевки и вывозки древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 2. С. 10-29.

67. Зорин М.В., Григорьев И.В. История и перспективы развития сборно-разборных покрытий для лесных дорог и технологических коридоров // Вестник АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 121-138.

68. Зорин М.В., Новгородов Д.В., Юдилевич А.М., Мануковский А.Ю., Куницкая О.А., Должиков И.С. Повышение эффективности лесозаготовительного производства за счет использования сборно-разборных дорожных покрытий на транспортных операциях // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 6 (18). С. 33-43.

69. Зорин М.В., Куницкая О.А. Типы современных пластиковых плит для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации. Сборник статей по материалам всероссийской научно-практической конференции. Петрозаводск, 2023. С. 28-30.

70. Зорин М.В., Куницкая О.А. Современные сборно-разборные покрытия для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). Минск, 2022. С. 54-57.

71. Sutherland B.J., Foreman A.D. Winter logging and soil protection in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 170. P. 102-115.

72. Материалы проверок Россельхознадзора по Республике Саха (Якутия) за 2021-2024 гг. Якутск, 2024. – 112 с.

73. Wästerlund H. Soil compaction by forestry machines // Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Ecology. 2020. Vol. 45. P. 23-35.

74. Riggert A. Sörensen L. Low-pressure tires and tracks for forwarders // Journal of Terramechanics. – 2019. – Vol. 84. – P. 10-18.

75. McNabb D.H., Startsev A. D. Soil compaction in boreal forests // Canadian Journal of Forest Research. 021. Vol. 51, no. 4. P. 512-525.

76. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стородубцева Т.Н. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры почвогрунтов криолитозоны на их физико-механических свойства // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 197-207.

77. Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высш. учеб. заведений, 2019. - 192 с.

78. Правила лесопользования в условиях криолитозоны: утверждены Министерством экологии, природопользования и лесного хозяйства РС(Я) 15.03.2019. – Якутск, 2019. – 45 с.

79. Рекомендации по рекультивации нарушенных земель в лесном фонде Республики Саха (Якутия). – Якутск: Министерство экологии РС(Я), 2022. – 34 с.

© Елисеев А.В., Хохлов А.А., Михайлова Л.М.,
Новиков М.С., Должиков И.С., Григорьева О.И., 2026