



УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ЛЕСНОЙ ПОЧВОГРУНТ В СЛОЖНЫХ СЕЗОННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

С.Е. Рудов¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

В.Я. Шапиро², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

О.А. Куницкая³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

О.И. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

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

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Традиционно в Российской Федерации лесозаготовительные работы в основном проводятся в зимний период. Это связано с преобладанием в лесном фонде площадей с заболоченными и переувлажненными почвогрунтами (III и IV категории), работа техники на которых в теплый период года затруднена, а иногда и невозможна. Работа лесозаготовительных предприятий в лесах криолитозоны, характеризующихся резко континентальным климатом, с сильными морозами в зимний период, осложнена тем, что при температуре ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ лесные машины не рекомендуется эксплуатировать из-за высокой вероятности поломок металлоконструкций и гидравлической системы. При этом в теплый период года большая часть лесосек на мерзлотных почвогрунтах становится трудно проходимой для тяжелых лесных машин. Получается, что удобный период для проведения лесозаготовительных работ в лесах криолитозоны достаточно небольшой. Это часто приводит к необходимости работы в так называемый период межсезонья, когда температура воздуха становится положительной и начинаются процессы оттаивания верхнего слоя почвогрунтов. Это же касается и лесозаготовительных предприятий, не работающих в условиях мерзлотных почвогрунтов, например в Ленинградской, Новгородской, Псковской, Вологодской областях и др. Наблюдаемое потепление климата вызывает существенное сокращение периода устойчивой зимней заготовки. Частые переходы температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зимний, осенний и весенний периоды приводят к необходимости также работать в период межсезонья, во время оттаивания почвогрунтов лесосек. В сложных сезонно-климатических условиях, к которым в первую очередь следует отнести межсезонные периоды в целом и наличие вечной мерзлоты в частности, учесть в математических моделях особенности процессов промерзания и оттаивания грунта и их влияние на характер процесса раз-

рушения весьма затруднительно. В статье показано, что при разработке долгосрочных прогнозных моделей показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ с целью повышения их надежности необходима оперативная корректировка расчетных параметров на базе учета фактических опытных данных на заданном шаге циклов.

Для цитирования: Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Прогнозная модель воздействия трелевочной системы на лесной почвогрунт в сложных сезонно-климатических условиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 131–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

Ключевые слова: мерзлый почвогрунт, оттаивающий почвогрунт, лесозаготовка, трелевочная система, уплотнение почвогрунта, деформация почвогрунта.

Введение

Одним из основных качественных показателей взаимодействия трелевочной системы с массивом лесного почвогрунта является глубина колеи h , для прогноза и определения которой используют различные подходы и математические модели [11–13].

Почвогрунт, как сложный природный анизотропный объект, трудно описывается в рамках моделей сплошной среды (упругой, упруго-пластической, вязкой или иной). В сложных сезонно-климатических условиях, к которым в первую очередь следует отнести межсезонные периоды в целом и наличие вечной мерзлоты в частности, учесть в математических моделях особенности процессов промерзания и оттаивания грунта и их влияние на характер процесса разрушения весьма затруднительно [14, 16–20].

Цель исследования заключается в разработке прогнозной математической модели повышенной надежности для расчета показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются мерзлотные почвогрунты лесов криолитозоны. Используются справочные данные о физико-механических свойствах мерзлотных грунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах. Попытка разработать прогнозную модель образования колеи в процессе N -кратного прохода трелевочной системы, основанную только на фактических данных показателя h при $N = 0$ ($h = h_0$), $N = 1$ ($h = h_1$) и $N = 2$ ($h = h_2$), предпринята в [9, 15]. Параметр N выступает в качестве времени.

Модель предполагает решение дифференциального логистического уравнения первого порядка Ферхюльста:

$$\frac{dh}{dN} = \frac{rh}{H} (H - h), \quad (1)$$

где r – постоянный коэффициент пропорциональности, подлежащий определению из начальных условий; H – максимальная глубина колеи.

В процессе решения уравнения (1) найдена константа r в виде

$$r = \ln \left[\frac{h_2(h_0 - h_1)}{h_0(h_1 - h_2)} \right], \quad (2)$$

при этом неопределенная константа интегрирования C принимается равной $C = \frac{h_0}{H}$.

Установлено, что график найденной функции $h(N)$ содержит асимптотический участок, абсцисса точки начала которого зависит от значения h_0 – исходной глубины колеи до первого цикла прохода.

На рис. 1 представлена типичная расчетная кривая $h(N)$, полученная в [8] при следующих опытных данных: $h_0 = 4$ см, $h_1 = 4,29$ см и $h_2 = 4,6$ см. При этом найдены константы $r = 0,0757$ и $C = 0,07207$. Для таких h_0 и C определен параметр максимальной глубины $H = 55,5$ см, и эта величина сохраняет постоянное значение при любом N вплоть до $N = 100$.

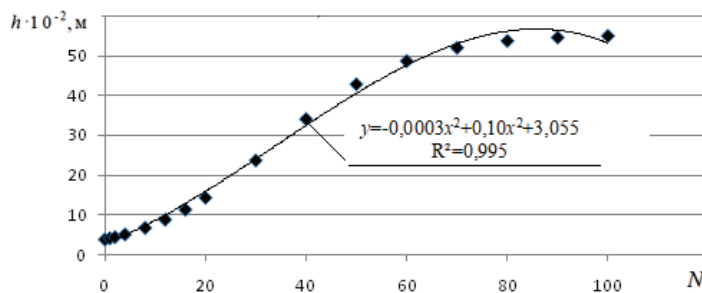


Рис. 1. Зависимость глубины колеи от количества проходов

Fig. 1. Dependence of the track depth (h) on the number of passes (N)

Анализ прогнозных показателей величины h по мере роста числа проходов трелевочной системы показывает, что, во-первых, от начальных значений и вплоть до $N = 30$ происходит резкое увеличение приращения глубины колеи (рис. 2).

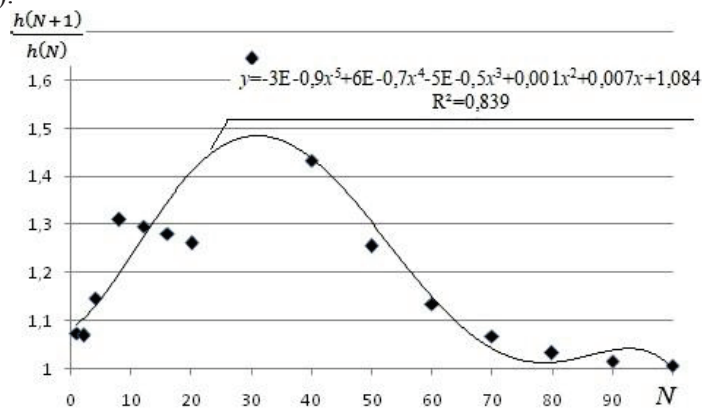


Рис. 2. Изменение отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ с ростом числа проходов

Fig. 2. Change in the ratio $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ as the number of passes increases

После этого момента времени наблюдаются аналогичный резкий спад приращений до достижения $N = 80$ и последующее плавное снижение прироста глубины колеи. Во-вторых, можно предположить, что подобный долгосрочный прогноз глубины колеи по трем фактическим данным h при $N = 0, 1, 2$ в узком диапазоне изменения h от 4 до 4,6 см без корректировки результатов расчетов приведет к существенному расхождению с фактическими показателями h даже при относительно небольших $N > 10$.

Еще одним аргументом в пользу необходимости корректировки расчетных данных является принятое условие $H = \text{const}$ на всем периоде изменения числа проходов N от 0 до 100, т. е. на достаточно большом отрезке времени.

Дело в том, отмечается в [5] на базе исследований [4], что в межсезонные периоды лесозаготовок, особенно на оттаивающих почвогрунтах, по мере увеличения глубины колеи и числа проходов трелевочной системы возрастает влажность грунта при приближении к водонепроницаемой границе с зоной мерзлоты. Глубину расположения указанной границы можно принять за глубину расположения твердого основания, т. е. за максимально возможную глубину колеи H .

Таким образом, с ростом N и параметр H имеет тенденцию к росту, при этом в силу увеличения влажности W несущая способность грунта (величина сцепления и угол внутреннего трения) существенно снижается [4], что неизбежно обусловит соответствующее уменьшение модуля общей деформации E .

В дополнение к сказанному в межсезонные периоды при больших температурных градиентах свойства почвогрунта во времени (а параметр N в предложенной модели является временным аргументом) существенно меняются. Из этого следует, что при значительных (более 10) изменениях параметра N трелевочная система будет взаимодействовать с объектом, обладающим иными по сравнению с исходными свойствами.

Математическая модель, разработанная в [5] на принципах формирования матриц переходных состояний Маркова [8, 10], показывает, что учет фактора влияния температуры окружающей среды на процессы перехода воды в лед и обратно приводит к росту вариативности исходных параметров, что снижает надежность прогноза конечных показателей глубины колеи.

Наряду с этим показатель влажности массивов сплошных сред различной природы под внешним статическим давлением также характеризуется большим разбросом [1, 2], что позволяет сделать вывод о зависимости состояния почвогрунта от количества циклов взаимодействия с ним трелевочной системы. Отмеченные особенности интегрально могут быть учтены только путем корректировки прогнозных данных в процессе опытной реализации расчетной модели.

Тем не менее подход [9] обладает очевидным преимуществом, вытекающим из отсутствия необходимости установления сведений о физико-механических свойствах лесного почвогрунта, особенно в сложных климатических условиях межсезонных периодов проведения лесозаготовительных работ. В связи с этим возникает потребность разработки такой прогнозной модели, которая основывалась бы также на опытных данных, но была открытой для ввода фактических показателей h при относительно небольшом шаге N (не более 5), т. е. обладала бы свойством оперативности.

Иными словами, если на каком-то этапе фактические значения глубины колеи h_{ϕ} отличаются от расчетных значений h в большую сторону на заданную погрешность, модель обязана учесть это расхождение и внести соответствующие коррективы.

Следуя принципам формирования логистического уравнения [8], будем считать, что скорость $\frac{dh}{dN}$ процесса образования колеи пропорциональна величине $H - h$, что приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dh}{dN} = k(H - h), \quad (3)$$

общее решение которого принимает вид

$$h = H - C_1 e^{-kN}. \quad (4)$$

Две неизвестные константы C_1 и k находим из начальных условий:

а) при одном опытном измерении в процессе первого прохода имеем:

$$\text{при } N = 0 \rightarrow h = 0; \text{ при } N = 1 \rightarrow h = h_1; \quad (5)$$

б) при двух опытных измерениях:

$$\text{при } N = 1 \rightarrow h = h_1; \text{ при } N = 2 \rightarrow h = h_2. \quad (6)$$

Частные решения при условиях (5) и (6) принимают соответственно вид

$$h = H - \frac{(H-h_1)^N}{H^{N-1}}; \quad (7a)$$

$$h = H - \frac{(H-h_2)^{N-1}}{(H-h_1)^{N-1}}. \quad (7b)$$

Возьмем за основу решение (7a) и пусть произведено одно измерение глубины колеи $h_1 = 0,02$ м после первого прохода трелевочной системы при опытном значении параметра максимальной глубины колеи до начала работ $H_0 = 0,3$ м.

На рис. 3, а представлен график зависимости $h(N)$, а на рис. 3, б (по аналогии с рис. 2) – изменение отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ с ростом N .

Анализ рис. 3, а позволяет сделать вывод об адекватном характере поведения кривой $h(N)$, а в соответствии с рис. 3, б уже при небольшом числе проходов, начиная практически с $N = 4-5$, наблюдается асимптотическое изменение прироста глубины колеи, что подтверждается и данными практики.

С целью более оперативного контроля за фактическими данными примем в качестве шага изменения числа проходов значение $N = 4$ и допустим, что на этом шаге фактическое $h_{\phi}(4) = 0,073$ отличается от расчетного $h(4) = 0,072$ м более чем на 1 %. Данное отличие примем за минимально допустимую погрешность Δh_{\min} определения параметра h .

Увеличение фактического значения h_{ϕ} по сравнению с расчетным h при постоянстве веса пачки трелюемых лесоматериалов P , давления в шинах q и скорости движения форвардера v можно трактовать как обусловленное ростом параметра H в связи со снижением несущей способности почвогрунта.

Для определения фактического $H_{\phi}(4)$, соответствующего измеренному значению $h_{\phi}(4)$, требуется решить трансцендентное уравнение:

$$h_{\phi}(4) - H_{\phi}(4) + \frac{(H_{\phi}(4) - h_1)^N}{H_{\phi}(4)^{N-1}} = 0. \quad (8)$$

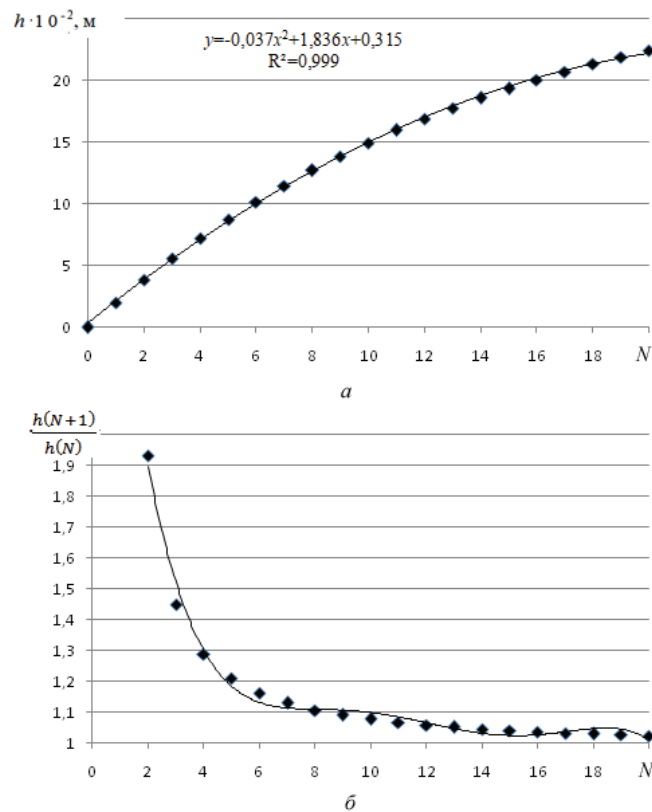


Рис. 3. Зависимости глубины колеи (a) и отношения $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ (b) от числа проходов

Fig. 3. Dependencies of the track depth (a) and the ratio $\frac{h(N+1)}{h(N)}$ (b) on the number of passes

Уточненное значение $H_{\phi}(4)$ необходимо учесть в соотношении (7а) для расчетов глубины колеи h на следующем шаге циклов, т.е. при изменении числа проходов в диапазоне $N = 5-8$.

Решение (8) численным способом дало возможность установить значение $H_{\phi} = 0,32$ м, что на 6,7 % превышает исходное значение $H_0 = 0,3$ м.

Уместно отметить, что между модулем общей деформации E и глубиной H существует устойчивая корреляционная связь: $H = 0,4714E^{-0,479}$, что позволяет сделать вывод о снижении модуля деформации от начального уровня $E_0 = 1290$ до $E = 1205$ кПа, т. е. более чем на 7 %. Этот результат обуславливает соответствующее увеличение общей деформации ϵ_0 почвогрунта в процессе воздействия на него трелевочной системы.

При $N = 8$ производят сравнение расчетных и фактических значений глубины колеи и при превышении h_{ϕ} над h более чем на допустимую погрешность Δh_{\min} повторяют алгоритм корректировки параметров h , H и E при выполнении расчетов на этапе $N = 9-12$ и т. д.

Расчетные и фактические значения указанных параметров в моменты корректировок приведены в таблице. Значения h_p соответствуют расчету по формуле (7а) без корректировки глубины колеи.

Параметры процесса образования колеи

N	h_p	h	h_ϕ	Δh , %	H	H_ϕ	ΔH , %	E	E_ϕ
	$\cdot 10^{-2}$, м				$\cdot 10^{-2}$, м				
4	7,2	7,2	7,3	1,4	30,0	32,0	6,7	1290	1205
8	12,7	12,9	13,3	4,7	32,0	37,3	16,5	1205	1119
12	16,9	18,1	18,5	9,5	37,3	41,0	9,9	1119	1070
16	20,1	22,5	23,0	14,4	41,0	43,4	5,9	1070	1041
20	22,4	26,5	27,0	20,5	43,4	45,6	5,0	1041	1017

На рис. 4, а представлены зависимости h_p и h_ϕ (кривые 1 и 2 соответственно) от числа проходов N , которые с высокой точностью описываются параболическими уравнениями, а на рис. 4, б – абсолютная погрешность Δh по мере роста N .

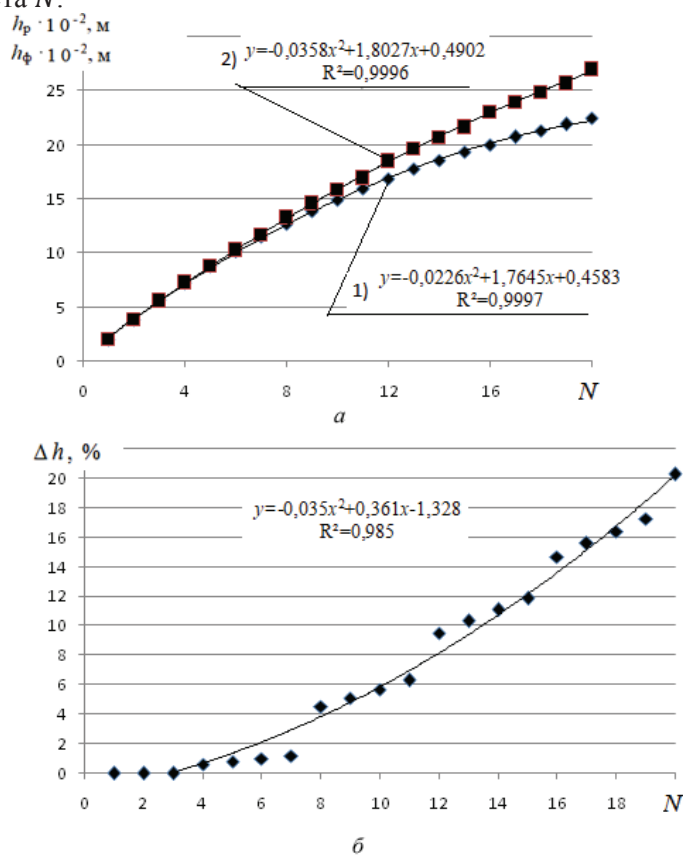


Рис. 4. Зависимости глубины колеи (а, 1 – h_p ; 2 – h_ϕ) и погрешности расчетов глубины колеи (б) от числа проходов

Fig. 4. Dependencies of the track depth (а, 1 – predicted track depth (h_p); 2 – actual track depth (h_ϕ)) and the track depth calculation error (Δh) on the number of passes

Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что после второй корректировки значений глубины колеи ($N \geq 8$) учет погрешности расчетов с помощью ввода в прогнозную модель опытных фактических данных является оправданным, поскольку значения Δh четырехкратно превышают допустимое значение

Δh_{\min} . При достижении числом проходов $N = 12$ погрешность расчетов приближается к 10 %, а затем превышает это значение, при $N = 20$ погрешность составляет 20 % и более. Учитывать такие расхождения представляется необходимым.

Интерес вызывает анализ параболических кривых на рис. 4, а и 4, б. Если с определенными оговорками можно говорить о проявлении асимптотического характера кривой $h_p(N)$, начиная с некоторого $N > 16$, то для кривой $h_\phi(N)$ и тем более кривой погрешностей $\Delta h(N)$ на рис. 4, б сделать такие выводы не представляется возможным. Более того, при $N > 16$ имеет место существенный рост параметра Δh , что позволяет заключить, что прогнозные долгосрочные модели при больших N (более 16) нельзя считать эффективными без механизма корректировок, хотя абсолютный прирост глубины колеи имеет тенденцию к снижению, в связи с чем растет и надежность расчетов.

В [5], на основе вариационного метода определения параметров взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим грунтом, разработана шкала несущей способности массива по критерию глубины колеи h .

Установлено, что величина h при постоянстве параметров влажности и коэффициента Пуассона пропорциональна давлению в шинах q :

$$h \sim a \sqrt{\frac{q}{2,2q+30,64}} \quad (9)$$

где a – радиус контактной площадки, зависящий от веса пачки P и, соответственно, q .

С помощью соотношения (9) представляется возможным оценить взаимосвязь между погрешностями определения глубины колеи и давления в шинах. Превышение параметра h на заданную погрешность Δh равносильно требованию снижения давления в шинах на Δq .

Современные системы управления форвардером позволяют при неблагоприятных условиях эксплуатации на слабых почвогрунтах и предельном погружении колес в почвогрунт снижать q до 20 %, в частности с 35 до 28–29 кПа [6, 7]. Проблема управления величиной q весьма актуальна в связи с необходимостью максимальной загрузки и повышения эффективности эксплуатации таких дорогостоящих лесных машин, как форвардеры [3].

Экологичные шины форвардеров, с низким давлением (до 10 кПа), могут быть особенно эффективными для участков почвогрунтов с низкой и чрезвычайно низкой несущей способностью V–VII категорий, где глубина колеи превышает 0,3 м.

Для обоснования взаимосвязи параметров Δh и Δq выполнены необходимые исследования, результаты которых представлены на рис. 5.

По данным рис. 5 снизить давление на 10 % представляется целесообразным, если погрешность Δh превысит расчетное значение h более чем на 4 %, т.е. когда имеет место четырехкратное превышение порогового значения $\Delta h_{\min} = 1$ %.

Если обратиться к рис. 4, б, то можно заключить, что число проходов N будет близко к значению 8, т.е. до второй корректировки величины h можно оперативно управлять процессом взаимодействия трелевочной системы с почвогрунтом лесосеки посредством контроля давления в шинах, допуская снижение до 10 %, в частности с 35 до 32 кПа. Максимально возможное уменьшение q на 20 % (с 35 до 29 кПа) позволяет оперативно корректировать глубину колеи в течение $N = 12$ циклов проходов трелевочной системы.

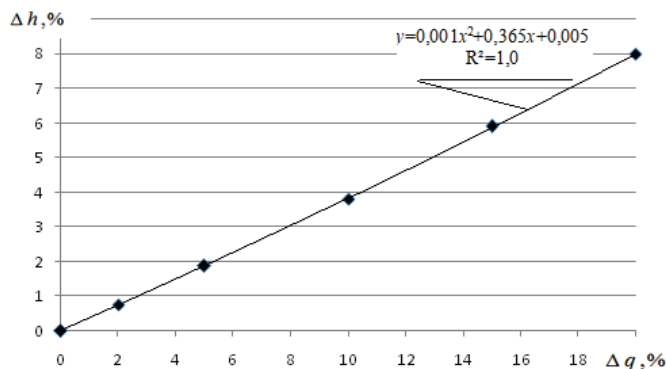


Рис. 5. Соотношение между погрешностями определения глубины колеи и давления в шинах

Fig. 5. The ratio between the track depth calculation error Δh and tire pressure calculation error (Δq)

Особо следует отметить снижение модуля деформации E_ϕ с ростом числа проходов, обусловленное увеличением значений параметра H_ϕ (поскольку с ним связаны процессы деформации почвогрунта). Результаты этих исследований отражают данные рис. 6, на котором представлены зависимости от числа проходов безразмерных величин: кривая 1 – отношения глубины H_ϕ к начальной глубине H_0 , кривая 2 – отношения уточненного модуля деформации E_ϕ к начальному E_0 .

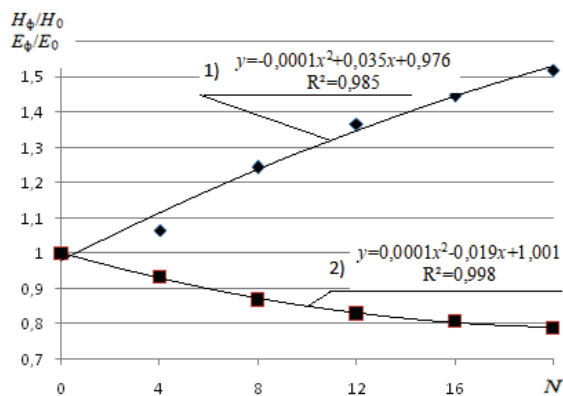


Рис. 6. Зависимости отношений максимальных глубин колеи (H_ϕ/H_0 , 1) и модулей общей деформации (E_ϕ/E_0 , 2) от числа проходов

Fig. 6. Dependences of the maximum track depths (H_ϕ/H_0 , 1) and deformation moduli (E_ϕ/E_0 , 2) on the number of passes; where index ϕ means actual, index 0 – initial

Как видно из характера поведения кривой 1 при долгосрочном прогнозе ($N > 16$), отклонение глубины от начального значения превышает 40 %, а модуля деформации – 20 %, что является дополнительным и весомым аргументом в пользу необходимости учета фактических данных в прогнозных моделях.

Принимая во внимание особую важность применения параметра E в различных математических моделях механики контактного разрушения сплошной среды, в частности моделях деформирования и разрушения оттаявшего грунта [5], на рис. 7 изображен график функции $E_{\phi}(N)$.

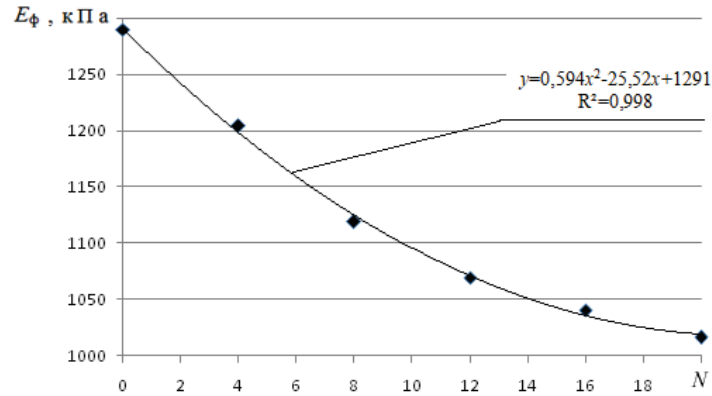


Рис. 7. Зависимость модуля общей деформации от числа проходов

Fig. 7. Dependence of the deformation modulus on the number of passes

Зависимости E_{ϕ} от N с достаточной точностью описываются затухающей параболой. При постоянстве давления в шинах это обусловит соответствующий рост показателя общей относительной деформации ε_0 почвогрунта.

Результаты исследований процесса образования колеи позволили получить данные (рис. 8) о характере изменения с ростом параметра N безразмерных величин: ξ_p – отношения расчетных значений $h_p(N + 1)$ и $h_p(N)$ и ξ_{ϕ} – отношения скорректированных значений $h_{\phi}(N + 1)$ и $h_{\phi}(N)$.

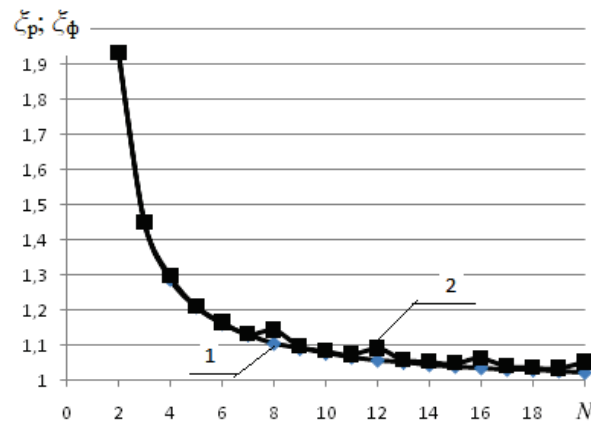


Рис. 8. Зависимость безразмерных величин ξ_p (1) и ξ_{ϕ} (2) от числа проходов

Fig. 8. Dependence of the predicted and actual dimensionless coefficients ξ_p (1) and ξ_{ϕ} (2) on the number of passes

Как видим, кривые 1 и 2 на рис. 8 фактически совпадают и имеют два четко выраженных участка: существенное снижение ξ до значений $N = 6-8$ и слабое асимптотическое снижение ξ при дальнейшем росте параметра N .

В заключительной части исследования уместно оценить влияние алгоритма корректировки прогнозных показателей по фактическим значениям глубины колеи на процесс деформации почвогрунта при наличии остаточной компоненты $\varepsilon_{п}$ в общей величине ε_0 (рис. 9).

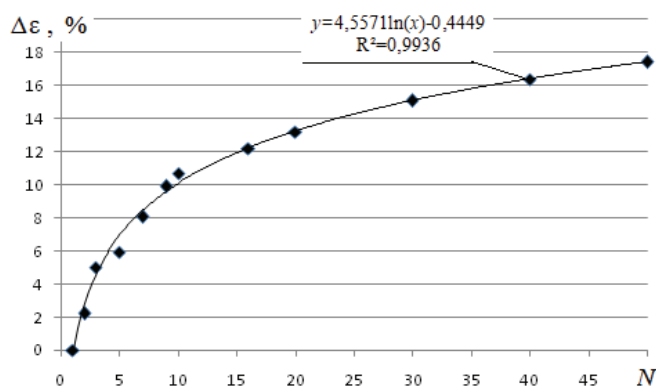


Рис. 9. Влияние числа проходов на погрешность определения общей деформации почвогрунта

Fig. 9. Influence of the number of passes on the deformation error of soil

Согласно рис. 9, с увеличением числа проходов N погрешность $\Delta\varepsilon$ при определении общей деформации с учетом и без учета фактических данных $h_{ф}$ практически не зависит от параметра $\varepsilon_{п}$, который изменялся в диапазоне от 0 до 50 % ε_0 . Как видно, при достижении параметра $N = 8-10$ погрешность $\Delta\varepsilon$ превышает 10 % и, несмотря на дальнейшее асимптотическое поведение возрастающей функции $\Delta\varepsilon(N)$, результаты свидетельствуют о правомерности предложенного подхода корректировки при реализации долгосрочных моделей установления глубины колеи и процессов деформации почвогрунта.

Заключение

Результаты выполненных исследований убедительно подтверждают вывод о том, что при разработке долгосрочных прогнозных моделей показателей циклического взаимодействия трелевочной системы с лесным почвогрунтом в сложных климатических условиях проведения межсезонных лесозаготовительных работ с целью повышения их надежности необходима оперативная корректировка расчетных параметров на базе учета фактических опытных данных на заданном шаге циклов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Катаров В.К., Сунёв В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2012. Т. 9, № 2. С. 73–81. [Katarov V.K., Syunev V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Trudy lesoinzhenerenogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2012, vol. 9, no. 2, pp. 73–81].

2. Ковалева Н.В., Катаров В.К., Ратькова Е.И. Исследование влияния циклов «замораживание – оттаивание» на характеристики лесных почво-грунтов, используемых при строительстве лесных дорог // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-3(8-3). С. 176–180. [Kovaleva N.V., Katarov V.K., Ratkova E.I. “Freezing and Defrosting” Effect on Characteristics of Forest Soils Used in Forest Road Construction. *Aktual’nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2014, vol. 2, no. 3-3(8-3), pp. 176–180]. DOI: [10.12737/4221](https://doi.org/10.12737/4221)
3. Прядкин В.И. Воздействие экологичной шины на почву // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7, № 3. С. 198–200. [Pryadkin V.I. Influence of the Harmless Tire on Ground. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2011, vol. 7, no. 3, pp. 198–200].
4. Роман Л.Т., Царанов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костоусов А.И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: КДУ, 2018. 188 с. [Roman L.T., Tsaranov M.N., Kotov P.I., Volokhov S.S., Motenko R.G., Cherkasov A.M., Shteyn A.I., Kostousov A.I. *A Guide for Determining the Physical and Mechanical Properties of Freezing, Frozen and Thawing Dispersed Soils*. Moscow, KDU Publ., 2018. 188 p.].
5. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 1. С. 52–61. [Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Interaction Features of Skidding System with Thawing Soil. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 52–61]. DOI: [10.18698/2542-1468-2019-1-52-61](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-52-61)
6. Сюнёв В.С., Катаров В.К. Воздействие процессов лесозаготовок на лесную среду Северо-Западного региона РФ // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2008. № 7. С. 120–121. [Syunev V.S., Katarov V.K. Wood Harvesting Processes Impact on the Forest Environment on the North-West of the Russian Federation. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2008, no. 7, pp. 120–121].
7. Сюнёв В.С., Катаров В.К. Особенности формирования инфраструктуры лесосек // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 2010. № 8. С. 151–152. [Syunev V.S., Katarov V.K. Features of Forming the Infrastructure of Cutting Areas. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Resources and Technology], 2010, no. 8, pp. 151–152].
8. Сюнёв В.С., Коновалов А.П., Селиверстов А.А. Сравнение эффективности технологий лесозаготовок на основе экспертного анализа // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2008. № 3(94). С. 89–93. [Syunev V.S., Konovalev A.P., Seliverstov A.A. Comparison the Effectiveness of of Logging Technologies Based on Expert Analysis. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences], 2008, no. 3(94), pp. 89–93].
9. Сюнёв В.С., Ратькова Е.И. Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды // Учен. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2012. № 6(127). С. 70–74. [Syunev V.S., Rat'kova E.I. Methods Prognosticating Harvesters' Impact on Soil during Transitional Seasons. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences], 2012, no. 6, pp. 70–74].
10. Сюнёв В.С., Соколов А.П. Применение логистического подхода к решению задач управления лесозаготовительным производством // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3, № 1. С. 447–452. [Syunev V., Sokolov A. Use of a Logistical Approach to the Wood Harvesting Planning Performance. *Al'ternativnyye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya*. 2016. T. 3, № 1. S. 447–452. [Syunev V., Sokolov A. Use of a Logistical Approach to the Wood Harvesting Planning Performance. *Al'ternativnyye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy ratsion-*

al'nogo ispol'zovaniya [Alternative Energy Sources in the Transport-Technological Complex: Problems and Prospects of Rational Use], 2016, vol. 3, no. 1, pp. 447–452]. DOI: [10.12737/17771](https://doi.org/10.12737/17771)

11. Finnegan J., Regan J.T., de Eyto E., Ryder E., Tiernan D. Healy M.G. Nutrient Dynamics in a Peatland Forest Riparian Buffer Zone and Implications for the Establishment of Planted Saplings. *Ecological Engineering*, 2012, vol. 47, pp. 155–164. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2012.06.023](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.023)

12. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 35–45.

13. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.

14. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.22.27](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27)

15. Kleibl M., Klvač R., Lombardini C., Porhaly J., Spinelli R. Soil Compaction and Recovery after Mechanized Final Felling of Italian Coastal Pine Plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–71.

16. Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Yu.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Increasing the Logging Road Efficiency by Reducing the Intensity of Rutting: Mathematical Modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 35–41. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.36.42](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.36.42)

17. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunickaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific Features of Influence of Propulsion Plants of the Wheel-Tire Tractors upon the Cryomorphic Soils, Soils, and Soil Grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 2052–2071.

18. Valera D.L., Gil J., Agüera J. Design of a New Sensor for Determination of the Effects of Tractor Field Usage in Southern Spain: Soil Sinkage and Alterations in the Cone Index and Dry Bulk Density. *Sensors*, 2012, vol. 12, iss. 10, pp. 13480–13490. DOI: [10.3390/s121013480](https://doi.org/10.3390/s121013480)

19. Wästerlund I., Andersson E. Increased Harvesting Operation Using Adapted Ground Pressure to Soil Conditions. *17th International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*. Blacksburg, VA, ISTVS, 2011, pp. 521–527.

20. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovskii A.Yu., Kunickaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. Modelling of Indenter Pressed into Heterogeneous Soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, iss. 8 SI, pp. 6419–6430. DOI: [10.36478/jeasci.2018.6419.6430](https://doi.org/10.36478/jeasci.2018.6419.6430)

A PREDICTIVE MODEL OF THE IMPACT OF THE SKIDDING SYSTEM ON FOREST SOIL IN SEVERE CLIMATIC CONDITIONS

S.E. Rudov¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

V.Ya. Shapiro², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

I.V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

O.A. Kunitskaya³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

O.I. Grigoreva², *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>*

¹Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

²St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva_o@list.ru

³Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoeye, 3-y km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

In the Russian Federation logging operations are traditionally carried out in winter. This is due to the predominance of areas with swamped and water-logged (class III and IV) soils in the forest fund, where work of forestry equipment is difficult, and sometimes impossible in the warm season. The work of logging companies in the forests of the cryolithozone, characterized by a sharply continental climate, with severe frosts in winter, is hampered by the fact that forest machines are not recommended to operate at temperatures below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ due to the high probability of breaking of metal structures and hydraulic system. At the same time, in the warm season, most of the cutting areas on cryosolic soils become difficult to pass for heavy forest machines. It turns out that the convenient period for logging in the forests of the cryolithozone is quite small. This results in the need of work in the so-called off-season period, when the air temperature becomes positive, and the thawing processes of the soil top layer begin. The same applies to the logging companies not operating in the conditions of cryosolic soils, for instance, in the Leningrad, Novgorod, Pskov, Vologda regions, etc. The observed climate warming has led to a significant reduction in the sustained period of winter logging. Frequent temperature transitions around $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in winter, autumn and spring necessitate to work during the off-season too, while cutting areas thaw. In bad seasonal and climatic conditions, which primarily include off-season periods in general and permafrost in particular, it is very difficult to take into account in mathematical models features of soil freezing and thawing and their effect on the destruction nature. The article shows that the development of long-term predictive models of indicators of cyclic interaction between the skidding system and forest soil in adverse climatic conditions of off-season logging operations in order to improve their reliability requires rapid adjustment of the calculated parameters based on the actual experimental data at a given step of the cycles.

For citation: Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. A Predictive Model of the Impact of the Skidding System on Forest Soil in Severe Climatic Conditions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 5, pp. 131–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-131-144

Keywords: frozen soil, thawing soil, logging, skidding system, soil compaction, soil deformation.

Поступила 03.07.19 / Received on July 3, 2019
