

Научная статья

УДК 630.90

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>

EDN: NTNPIR

Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог

И. Н. Кручинин¹, О. Н. Бурмистрова², В. Ю. Задворнов³, К. С. Отев^{2✉}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет,

Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

² Ухтинский государственный технический университет,

Российская Федерация, 169300, Ухта, ул. Первомайская, 13

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Российская Федерация, 614000, Пермь, Комсомольский просп., 29

otev.kirill@mail.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Рассмотрена проблема совершенствования методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог с использованием обобщённого показателя эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги. Использование снега или снегольда в качестве дорожно-строительного материала вызывает значительные трудности при эксплуатации зимних лесных дорог. Решить эту проблему позволяет впервые разработанная методика оценки по обобщённому показателю эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия, что и определило цель настоящей работы. *Целью* исследований была разработка методики оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог. *Объекты и методы.* Объектами исследования являются зимние дорожные покрытия лесных дорог, обработанные каменными фрикционными материалами. Для исследования их работы были применены методы теории нечёткой логики и нечётких множеств. *Результаты.* В результате проведённых исследований были разработаны варианты обработки фрикционными материалами зимних дорожных покрытий. Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрикционными каменными материалами следует считать: для фр. 5–10 мм при плотности распределения – не менее 6,5 кг/м²; для фр. 10–15 мм плотностью распределения – не менее 6,0 кг/м²; для фр. 10–20 плотностью распределения каменных материалов – не менее 9,0 кг/м², при значении обобщённого показателя транспортно-эксплуатационного состояния – не менее 0,605. *Выводы.* Разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщённому показателю может быть рекомендована для повышения эффективности эксплуатации зимних лесных дорог, а также для разработки регламентов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: коэффициент сцепления; динамический модуль прогиба; фрикционные материалы; показатель эффективности; метод оценки; нечёткая логика; нечёткие множества; строительство дорог

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Разработка методов оценки зимних дорожных покрытий лесных дорог / И. Н. Кручинин, О. Н. Бурмистрова, В. Ю. Задворнов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 73–85. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>; EDN: NTNPIR

Введение

Транспортное освоение лесосырьевых баз в летний период года чаще всего осуществляется по лесотранспортным сетям

круглогодичного действия с дорожными покрытиями капитального типа. Почти все работы посвящены либо процессам строительства, либо процессам эксплуатации

лесных дорог только для летнего периода года. Однако особенности строительства зимних лесных дорог и их эксплуатация чаще всего не рассматриваются [1, 2].

Основные способы строительства зимних дорог из снега были сформулированы и апробированы ещё в начале прошлого века. Исследования таких учёных, как А. Ф. Вуори, Н. Н. Галахова, П. П. Кузмина, Г. Д. Рихтера стали основой по строительству и эксплуатации автозимников. Что же касается лесных дорог, то следует отметить исследования В. И. Алябьева, М. М. Корунова, С. И. Морозова. В то же время, начиная с 1990-х годов наблюдалось снижение интереса к исследованиям снежных покрытий и автозимников. Это привело к тому, что основные методы изучения физико-механических свойств снежных дорожных покрытий не получили дальнейшего развития.

Что касается современных исследований, то они в основном направлены только на зимнее содержание автомобильных дорог. Чаще всего, зимняя эксплуатация сводится либо к полной ликвидации снежного дорожного покрытия, либо только к очистке его от снега или борьбе с зимней скользкостью [3]. Отсутствуют основные критерии оценки транспортно-эксплуатационных показателей как снежных, так и снежно-ледяных дорожных покрытий зимних лесных дорог. Практически не рассматривается влияние лесовозных автопоездов на зимние покрытия. Для зимних лесных дорог характерно исполнение покрытия из снега, уплотнённого снежного покрова, снегольда или льда [3–6]¹.

Необходимо учитывать, что лесовозный автотранспорт, эксплуатируемый в условиях лесотранспортной инфраструктуры, имеет существенные отличия от традиционного грузового автотранспорта,

эксплуатируемого на дорогах общего пользования [2].

Именно при использовании каменного фрикционного материала существует возможность регулировать коэффициент сцепления и прочность зимних дорожных покрытий. На это же указывают и исследования некоторых учёных, предположивших, что изменения технологий содержания лесных дорог позволяют продлить сроки их действия и продлить эксплуатацию весной [3, 7].

Очевидно, что традиционные методы повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог и их оценки не способны обеспечить экономически целесообразных решений. В этой связи создание новых методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог, обработанных каменными фрикционными материалами, с использованием методов теории нечёткой логики и нечётких множеств, является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований была разработка метода оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог на основе обобщённого комплексного показателя с использованием элементов теории нечёткой логики и нечётких множеств.

В работе решались следующие **задачи**: 1) оценка транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог; 2) обоснование критериев обобщённого показателя зимних дорожных покрытий; 3) формирование обучающих выборок для настройки нейронечёткой сети по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог для различных критериев.

Материалы и методы

В нормативно-технической документации используется термин «автозимники». Особенности их строительства и содержания посвящено значительное количе-

¹ ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания. Введ. 2020-01-01. М.: Стандартинформ, 2020. 56 с.

ство работ [3, 4]. В этих работах значительное место отводится не только особенностям местности расположения автомобильных дорог, характеристикам дорожно-климатических условий, но и технологиям строительства и содержания зимних дорожных покрытий.

Итогом многолетних наблюдений за климатическими условиями лесосырьевых баз [1, 3, 8–10] стало подробное описание условий и закономерностей формирования на их территориях снежного покрова.

Известно, что в зимний период года снег послойно накапливается и формирует снежный покров.

Особо следует отметить, что в условиях лесосырьевых баз Северо-Западного региона снежный покров формируется несколько по иным принципам, чем в условиях, где отсутствует лесная древесная растительность [1]. Происходит интенсивное перераспределение снежных осадков за счёт лесной растительности. Существенно уменьшено ветровое воздействие на снежный покров.

Таким образом, в процессе строительства и содержания зимних дорожных покрытий лесных дорог приходится учитывать значительное количество факторов как природно-климатических, технологических, так и физико-механических.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что в качестве выходных параметров оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог достаточно иметь значения коэффициента сцепления колёс лесовозного транспорта с зимними дорожными покрытиями и модуля их динамического прогиба [11, 12].

В общем виде коэффициент сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог $F_{сц}$ однозначно может быть описан функцией:

$$F_{сц} = f(P_{сн}, \Phi_p, N_p), \quad (1)$$

где $P_{сн}$ – плотность зимнего дорожного покрытия, г/см³; Φ_p – размер частиц каменного фрикционного материала, мм; N_p – плотность распределения каменных

фрикционных материалов по дорожному покрытию, кг/м².

В результате инструментального измерения коэффициента сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимними дорожными покрытиями лесных дорог установлено, что их величины варьируются в значительном диапазоне [4, 13]. На коэффициент сцепления оказывает своё влияние плотность зимнего дорожного покрытия, его жёсткость, тип каменного фрикционного материала, его плотность распределения по покрытию, размер зёрен каменного фрикционного материала, способ распределения каменного фрикционного материала по зимнему дорожному покрытию, расположение фрикционного материала на проезжей части лесной дороги, погодно-климатические условия [14, 15].

То же можно сказать и о показателях жёсткости зимних дорожных покрытий. Наши исследования [16] позволили сделать вывод, что в качестве дополнительного выходного параметра при оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних покрытий следует выбирать динамический прогиб дорожной поверхности. При анализе результатов измерения модулей динамических прогибов зимних покрытий было выявлено, что они тоже существенно варьируются. На динамический прогиб зимнего покрытия оказывают влияние: степень уплотнения дорожного покрытия; тип зимней дорожной одежды; толщина дорожного покрытия; способ уплотнения дорожного покрытия; природно-климатические факторы [17, 18].

Оценка прочности зимнего дорожного покрытия D_n из уплотнённого снега или снегольда может быть описана при помощи функции:

$$D_n = f(H_{сн}, N_p, P_{сн}), \quad (2)$$

где $H_{сн}$ – толщина зимнего дорожного покрытия, см; N_p – плотность распределения каменных фрикционных материалов по дорожному покрытию, кг/м²; $P_{сн}$ – плотность зимнего дорожного покрытия, г/см³.

Таким образом, выбрав в качестве основных критериев эффективности коэффициент сцепления колёс лесовозного автотранспорта автомобилей с зимним дорожным покрытием лесных дорог и прочность покрытия, пришлось столкнуться с тем, что задача по оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог является многопараметрической и характеризуется неопределённостью в данных. То есть решение задачи в обычной формулировке оценки транспортно-эксплуатационного состояния невозможно, поэтому воспользуемся методом формирования обобщённого комплексного показателя эффективности.

В нашем случае оценка транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог будет заключаться в определении следующих параметров: значения коэффициента сцепления с дорожным покрытием через коэффициент сцепления; значения прочности дорожного покрытия через динамический модуль прогиба.

Будем считать, что за обобщённый показатель эффективности принята сумма частных показателей. Ввиду того, что частные показатели имеют не только различную физическую сущность, но и разные размерности и методы их отображения, их необходимо привести к обобщённому, безразмерному виду.

Для анализа доли вклада каждого частного показателя необходимо восполь-

зоваться оценкой с помощью коэффициентов весов. Все коэффициенты выбираются таким образом, чтобы общая сумма сформированных коэффициентов была равна единице. В нашем случае для назначения приоритетности частных показателей назначим им отдельные весовые коэффициенты. Наши коэффициенты k_1 и k_2 при каждом частном показателе будут определяться на основании опытных данных.

В общем виде разработанный обобщённый показатель эффективности C транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги может быть описан функцией:

$$C = \frac{k_1(F_{C\text{Ц}i} - F_{C\text{Ц}i}^{\min})}{F_{C\text{Ц}i}^{\max} - F_{C\text{Ц}i}^{\min}} + \frac{k_2(D_{\text{П}i} - D_{\text{П}i}^{\min})}{D_{\text{П}i}^{\max} - D_{\text{П}i}^{\min}}, \quad (3)$$

где k_i – весовые коэффициенты частных критериев; $F_{C\text{Ц}i}^{\min}$, $F_{C\text{Ц}i}^{\max}$ – минимальные и максимальные значения показателей коэффициента сцепления с зимней дорожной поверхностью; $D_{\text{П}i}^{\min}$, $D_{\text{П}i}^{\max}$ – минимальные и максимальные значения динамического модуля прогиба зимнего дорожного покрытия, МПа.

Перед проведением оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог была разработана общая программа исследований. Фрагмент общей программы исследований по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог представлен в табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент программы исследования по оценке транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог

Table 1. Fragment of the research program for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads

№ серии	Условия испытаний	№ серии	Условия испытаний
	Зимнее дорожное покрытие, необработанное щебнем		Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 15–20 мм
1.2 С	СДП – плотность 0,45 г/см ³	5.2. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²
1.4 С	СДП – плотность 0,55 г/см ³	5.3. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 7,0 кг/м ²
1.6 С	СДП – плотность 0,65 г/см ³	5.4. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²

Окончание таблицы 1

№ серии	Условия испытаний	№ серии	Условия испытаний
1.9 Л	СЛДП – плотность 0,76 г/см ³	5.9. ЭЩ	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²
Зимнее дорожное покрытие, обработанное песком фр. 0–5 мм		Зимнее дорожное покрытие, обработанное песчано-щебёночной смесью С 2 (фр. 0–20)	
2.1. ЭП	ЭСДП – плотность 0,55 г/см ³ , плотность распределения – 0,1 кг/м ²	6.3. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 5,0 кг/м ²
2.3. ЭП	ЭСДП – плотность 0,55 г/см ³ , плотность распределения – 0,2 кг/м ²	6.4. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 3,0 кг/м ²
2.5. ЭП	ЭСЛДП – плотность 0,76 г/см ³ , плотность посыпки – 0,3 кг/ м ²	6.5. ЭЩ	ЭСДП – плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 8,0 кг/м ²
2.8. ЭП	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 0,2 кг/м ²	6.9. ЭЩ	ЭСЛДП – плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²
Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 10–15 мм		Зимнее дорожное покрытие, обработанное щебнем фр. 5–20 мм	
4.3. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 5,0 кг/м ²	7.4. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 8,0 кг/м ²
4.4. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 1,0 кг/м ²	7.5. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 4,0 кг/ м ²
4.5. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,50 г/см ³ , плотность распределения – 4,0 кг/м ²	7.6. ЭЩ	ЭСДП плотность 0,65 г/см ³ , плотность распределения – 12,0 кг/м ²
4.9. ЭЩ	ЭСЛДП плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²	7.9. ЭЩ	ЭСЛДП плотность 0,80 г/см ³ , плотность распределения – 3 кг/м ²

Примечание: СДП – зимнее дорожное покрытие, необработанное щебнем; СЛДП – зимнее снежно-ледяное дорожное покрытие; ЭСДП – эксплуатируемое, обработанное каменными материалами зимнее дорожное покрытие; ЭСЛДП – эксплуатируемое, обработанное каменными материалами снежно-ледяное зимнее дорожное покрытие.

При обработке полученных опытно-экспериментальных данных были использованы классические методы обработки статистических данных.

Основные транспортно-эксплуатационные показатели зимних дорожных покрытий были получены в процессе эксплуатации участков лесных дорог на полигоне,

расположенном на территории лесосырьевой базы Пермского края в период с февраля по март 2024 года. Для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей были использованы каменные фрикционные материалы. В табл. 2 представлены их основные физико-механические и зерновые показатели.

Таблица 2. Характеристика каменных фрикционных материалов, применяемых для повышения транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог

Table 2. Characteristics of stone friction materials used to improve the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads

Каменные материалы	Физико-механические показатели			
	Фр., мм	Размер зёрен материала, фр., мм	Прочность	Норма распределения, кг/м ²
Песок	0 – 5	0,16 – 5	–	0,2 – 0,5
Посыпка антигололёдная	0 – 2,5	0,16 – 2,5	600	0,2 – 0,5
Щебень	5 – 10	5 – 10	800	2,0 – 7,0
Щебень	5 – 15	5 – 15	800	2,0 – 5,0
Щебень	10 – 15	10 – 15	1000	3,0 – 7,0
Щебень	15 – 20	15 – 20	1000	5,0 – 8,0
Песчано-щебёночная смесь	С2	0,16 – 20	1200	0,5 – 3,0

Результаты

В результате исследований получены значения прочностных показателей и коэффициентов сцепления зимних лесных дорог в зависимости от вида снежных покрытий и способов их содержания.

В качестве эксплуатационных показателей был использован коэффициент сцепления, полученный с помощью прибора ППКА – МАДИ, а оценка прочностных показателей производилась с применением электронного динамического плотномера типа ZFG-3000-10 GPS.

Методика измерения коэффициента сцепления с зимним дорожным покрытием предполагает подготовку самого покрытия. Норма распределения каменного фрикционного материала проводилась методом взвешивания контрольного лотка. Прибор ППКА – МАДИ устанавливался на подготовленную горизонтальную поверхность в полосе наката на зимнем дорожном покрытии.

Динамический плотномер типа ZFG-3000-10 GPS производит измерение прогиба дорожного покрытия при падении груза на круглый штамп. Результатом измерения служит динамический прогиб зимнего дорожного покрытия, измеряемый в МПа. На рис. 1 представлены рабочие моменты проведения испытаний по оценке транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий.

При решении задачи оценки коэффициента сцепления по выражению (1) в качестве выходного параметра принималось значение сцепления колёс лесовозного автотранспорта с зимним покрытием. Диапазон измерения составил от 0,1 до 0,71. В качестве входных параметров были применены: плотность зимнего дорожного покрытия, при этом плотность покрытия оценивалась от свежеснежавшего снега до снежно-ледяных отложений, г/см^3 ; размер зёрен каменного фрикционного материала, используемого для обработки дорожных покрытий лесных дорог, мм; плотность распределения фрикционных каменных материалов по дорожному покрытию, кг/м^2 .

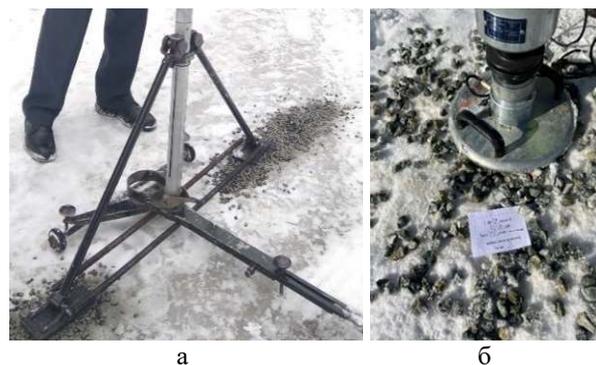


Рис. 1. Опытно-экспериментальные исследования снежного дорожного покрытия (фото авторов)
 а – измерение коэффициента сцепления;
 б – измерение динамического модуля прогиба с использованием ZFG-3000-10 GPS

Fig. 1. Experimental research of snow road surfaces (photo by the author)
 a – measurement of the adhesion coefficient;
 b – measurement of the dynamic deflection modulus using ZFG-3000-10 GPS

Так как задача оценки коэффициента сцепления с зимними дорожными покрытиями лесных дорог характеризуется неопределённостью в полученных данных, то при разработке системы оценки эффективности использована адаптивная нейронечёткая продукционная сеть типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Эта сеть имеет свойства продукционных нечётких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей. Продукционная сеть разрабатывалась в среде MATLAB.

В табл. 3 приведены параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних лесных дорог по критерию коэффициента сцепления.

При этом, можно наблюдать участки снежного покрытия с одинаковыми показателями коэффициента сцепления, но отличающимися количеством распределения каменного фрикционного материала.

Решение задачи оценки прочности зимних дорожных покрытий проводилось с помощью выражения (2). В качестве выходного параметра принимали динамический прогиб дорожного покрытия. Прогиб оценивали динамическим модулем прогиба дорожного покрытия в МПа.

Таблица 3. Обучающие выборки для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию коэффициента сцепления

Table 3. Training samples for assessing the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads based on the adhesion coefficient criterion

Вид зимнего дорожного покрытия	Плотность зимнего дорожного покрытия, г/см ³	Фр., мм	Размер зёрен каменного материала фр., мм	Плотность распределения фрикционных каменных материалов, кг/м ²	Коэффициент сцепления с покрытием
Снежное уплотнённое	0,65	нет	нет	нет	0,22
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	2,0	0,31
Снежное уплотнённое	0,65	15–20	15–20	6,0	0,43
Снежное не уплотнённое	0,35	15–20	15–20	5,0	0,39
Снежно-ледяное	0,76	0–20	0,16–20	3,0	0,32
Снежное уплотнённое	0,65	0–5	0,16–5	0,2	0,28
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	5,0	0,40
Снежное уплотнённое	0,65	8–16	8–16	4,0	0,36
Снежное не уплотнённое	0,35	5–20	5–20	5,0	0,33
Снежное уплотнённое	0,65	5–20	5–20	10,0	0,48
Снежно-ледяное	0,76	10–15	10–15	3,0	0,31
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	5,0	0,32
Ледяное	0,78	0–5	0,16–5	0,2	0,28
Снежное уплотнённое	0,65	5–10	5–10	5,0	0,42
Ледяное	0,78	5–10	5–10	5,0	0,32
Снежное уплотнённое	0,65	C2	0,16–20	5,0	0,35
Снежное не уплотнённое	0,35	C2	0,16–20	3,0	0,28
Снежное уплотнённое	0,50	5–10	5–10	7,0	0,40
Снежно-ледяное	0,76	8–16	8–16	5,0	0,38
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	3,0	0,31
Ледяное	0,80	0–20	0,16–20	1,0	0,28

В результате измерений был зафиксирован диапазон от 89,2 до 277,3 МПа. В качестве входных параметров были использованы: плотность зимнего дорожного покрытия, при этом плотность покрытия оценивалась от свежесвыпавшего снега до снежно-ледяных отложений (г/см³); плотность распределения фрикционных каменных материалов по дорожному покрытию (кг/м²); толщина зимнего дорожного покрытия (см).

В табл. 4 приведены параметры обучающих выборок для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию динамического модуля прогиба.

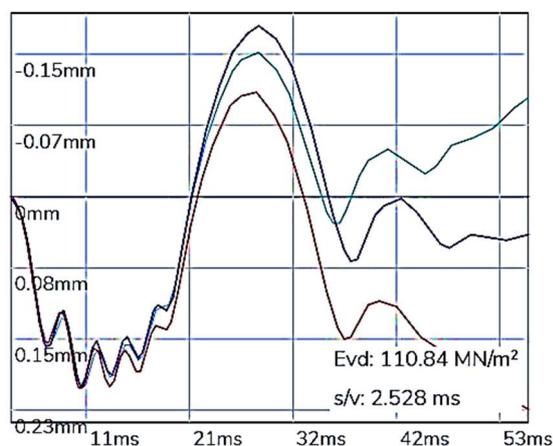
Динамический плотномер ZFG-3000-10 GPS имеет встроенную функцию построения графических зависимостей динамических прогибов в зависимости от времени приложения нагрузки. Анализ графиков динамических прогибов зимних дорожных покрытий показал, что на величину прогибов оказывает влияние как плотность дорожного покрытия, так и плотность обработки каменными фрикционными материалами.

На рис. 2 и 3 представлены графические зависимости динамических прогибов зимних дорожных покрытий, обработанных и не обработанных каменными материалами.

Таблица 4. Обучающие выборки для оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог по критерию динамического модуля прогиба

Table 4. Training samples for assessing the transport and operational performance of winter road surfaces of forest roads based on the dynamic deflection modulus criterion

Вид зимнего дорожного покрытия	Плотность зимнего дорожного покрытия, г/см ³	Фр., мм	Размер зёрен каменного материала фр., мм	Плотность распределения фрикционных каменных материалов, кг/м ²	Динамический модуль прогиба, МПа
Снежное уплотнённое	0,65	нет	нет	нет	110,8
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	2,0	36,4
Снежное уплотнённое	0,65	15–20	15–20	6,0	225,2
Снежное не уплотнённое	0,35	15–20	15–20	5,0	46,8
Снежно-ледяное	0,76	0–20	0,16–20	3,0	284,6
Снежное уплотнённое	0,65	0–5	0,16–5	0,2	116,8
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	5,0	267,8
Снежное уплотнённое	0,65	8–16	8–16	4,0	172,5
Снежное не уплотнённое	0,35	5–20	5–20	5,0	46,5
Снежное уплотнённое	0,65	5–20	5–20	10,0	212,2
Снежно-ледяное	0,76	10–15	10–15	3,0	210,2
Снежное не уплотнённое	0,35	5–10	5–10	5,0	46,8
Ледяное	0,78	0–5	0,16–5	0,2	292,1
Снежное уплотнённое	0,65	5–10	5–10	5,0	192,2
Ледяное	0,78	5–10	5–10	5,0	277,8
Снежное уплотнённое	0,65	C2	0,16–20	5,0	208,1
Снежное не уплотнённое	0,35	C2	0,16–20	3,0	58,6
Снежное уплотнённое	0,50	5–10	5–10	7,0	254,3
Снежно-ледяное	0,76	8–16	8–16	5,0	185,4
Снежное уплотнённое	0,65	0–20	0,16–20	3,0	212,2
Ледяное	0,80	0–20	0,16–20	1,0	268,7

Рис. 2. Динамический прогиб неапатанного зимнего дорожного покрытия толщиной 15 см, плотность 0,65 г/см³Fig. 2. Dynamic deflection of untreated winter road surface 15 cm thick, density 0.65 g/cm³

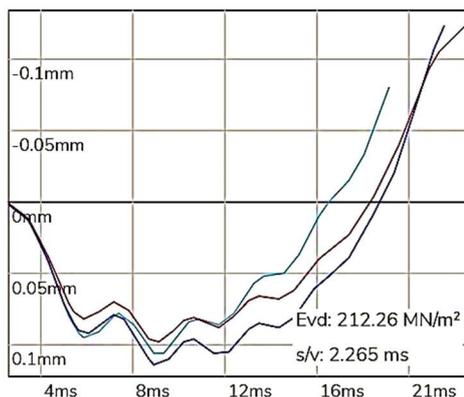


Рис. 3. Динамический прогиб зимнего дорожного покрытия толщиной 18 см, обработанного щебнем фр. 5–20 мм, плотность распределения 10 кг/м²

Fig. 3. Dynamic deflection of a winter road surface 18 cm thick treated with crushed stone of fraction 5–20 mm, distribution density 10 kg/m²

Для необработанных зимних покрытий характерны незначительные деформации и быстрое изменение амплитуд динамических прогибов. Каменные фрикционные материалы, распределённые на дорожном покрытии, существенно изменяют их прочностные показатели. С возрастанием нормы распределения изменяются и динамические параметры покрытий.

Выбрав в качестве критерия обобщённый показатель, пришлось столкнуться с тем, что задача оценки транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог характеризуется взаимозависимыми параметрами. Поэтому для решения именно такого класса задач следует использовать методы теории оптимизации по весовым коэффициентам.

Таблица 5. Результаты расчётов обобщённого показателя эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги

Table 5. Results of calculations of the generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface of a forest road

Наименование параметра	Варианты обработки зимнего дорожного покрытия каменными фрикционными материалами				
	А	Б	В	Г	Д
Плотность зимнего дорожного покрытия $P_{сн}$, г/см ³	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Размер зёрен каменного материала Φ_p , мм	0-5	5-10	10-15	5-20	0-20
Плотность распределения фрикционных каменных материалов N_p по покрытию, кг/м ²	0,2	6,5	4,0	7,0	5,0
Толщина зимнего дорожного покрытия $H_{сн}$, см	9	17	23	18	19
Коэффициент сцепления с зимним дорожным покрытием $F_{сц}$	0,28	0,49	0,36	0,48	0,37
Динамический модуль прогиба зимнего дорожного покрытия $D_{п}$, МПа	116,8	192,2	172,5	212,2	208,1
Обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния, C	0,215	0,605	0,440	0,461	0,550

Постановка задачи в содержательном виде выполнялась на основе выражения (3).

Введём ограничения по показателям. Величина коэффициента сцепления с уплотнённым снежным дорожным покрытием:

$$\begin{cases} F_{сц}^{\min} = 0,10 \\ F_{сц}^{\max} = 0,71 \end{cases} \quad (4)$$

Величина динамического модуля прогиба зимнего дорожного покрытия лесной дороги, МПа:

$$\begin{cases} D_{п}^{\min} = 89,2 \text{ МПа} \\ D_{п}^{\max} = 277,3 \text{ МПа} \end{cases} \quad (5)$$

Результаты исследований и расчётов по полученным уравнениям параметров сведены в табл. 5.

Заключение

Разработка методов оценки основных транспортно-эксплуатационных показателей зимних дорожных покрытий лесных дорог является сложной задачей со многими взаимозависимыми параметрами и характеризуется неопределённостью данных. Проведена оценка влияния типов зимних дорожных покрытий на их транспортно-эксплуатационные показатели, выполнены измерения коэффициентов сцепления с покрытиями в зависимости от их толщины, плотности, вида каменного фрикционного материала и плотности его распределения. Подобрана технология измерения коэффициента сцепления. Впервые получены данные о прочности зимних дорожных покрытий с использованием динамических методов измерения. Определены динамические прогибы покрытий и измерены динамические модули этих прогибов. Разработан обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния зимнего дорожного покрытия лесной дороги. На основании проведённых исследований были разработаны варианты обработки фрикционными материалами зимних дорожных покрытий.

Рациональными значениями при обработке зимних дорожных покрытий фрик-

ционными каменными материалами следует считать: для фр. 5–10 мм при плотности распределения не менее 6,5 кг/м²; для фракций 10–15 мм с плотностью распределения не менее 6,0 кг/м²; для фракций 10–20 мм с плотностью распределения каменных материалов не менее 9,0 кг/м², при значении обобщённого показателя транспортно-эксплуатационного состояния не менее 0,605. При этих параметрах были зафиксированы значения коэффициента сцепления с зимней дорожной поверхностью не менее 0,49 и модуля динамического прогиба не менее 192,2 МПа. По мере снижения размеров зёрен каменного материала изменяется и обобщённый показатель эффективности транспортно-эксплуатационного состояния. Так, использование песка фракции 0–5 мм имеет показатель эффективности $C = 0,215$, что неприемлемо для зимних дорожных покрытий.

Разработанная методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния зимних дорожных покрытий лесных дорог по обобщённому показателю может быть рекомендована для повышения эффективности эксплуатации зимних лесных дорог, а также для разработки регламентов по зимнему содержанию лесотранспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галахов Н. Н. Снежный покров в лесу // Метеорология и гидрология. 1940. № 3. С. 15–16.
2. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев, Б. А. Ильин, Б. И. Кувалдин и др. М.: Лесная промышленность, 1990. 416 с.
3. Зимние дороги в лесной промышленности / С. И. Морозов, Ф. А. Павлов, Л. Н. Плакса и др. М.: Лесная промышленность, 1969. 168 с.
4. Афанасьев И. А., Кручинин И. Н. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона: монография. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 135 с.
5. Lee J. An improved slip-based model for tire-snow interaction // SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2011. Vol. 4, iss. 1. Pp. 278–288. DOI: 10.4271/2011-01-0188
6. Thompson M. P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing. 2009. 284 p
7. Корунов М. М. Ускоренный способ постройки зимних дорог. М.: Гослестехиздат, 1946. 34 с.
8. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
9. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
10. Планирование сроков эксплуатации зимних лесовозных дорог на основе анализа статистики климатических данных / А. П. Мохирев, Е. В. Горяева, М. П. Мохирев и др. // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 176–185. DOI: 10.12737/article_5b2406175e7765.44768086; EDN: XRUBWP
11. Уравнения связи параметров состояния снега и зависимости их от деформации снежного покрова / А. Н. Кожевников, В. В. Беляков, В. А. Малыгин и др. // Проектирование, испытания, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники: сборник научных трудов к 60-летию кафедры «Ав-

томобили и тракторы». Н. Новгород: НГТУ, 1997. С. 121–129.

12. Патент на полезную модель № 219114. Устройство для формирования уплотнённого снежного покрытия / И. Н. Кручинин, А. А. Лабыкин, Д. В. Овсейчик, В. В. Побединский, О. Н. Бурмистрова, В. С. Авдеева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛТУ. № 2023112508; заявл. 16.05.2023; опубл. 28.06.2023. EDN: НКIWOM

13. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. Report 97-3. / L. H. Shapiro, J. B. Johnson, M. Sturm et al. // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.

14. Вуори А. Ф. Механические свойства снега как строительного материала // Физические методы исследования льда и снега: сборник трудов. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 118 с.

15. Войтковский К. Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.

16. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния уплотнённого снежного покрова зимних лесных дорог с использованием нейронных сетей / А. А. Лабыкин, И. Н. Кручинин, В. В. Побединский и др. // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 3. С. 3–10. EDN: НТЕНWN

17. Совершенствование методов технологического контроля уплотнённого снежного покрова при строительстве и эксплуатации зимней транспортной инфраструктуры лесов / А. А. Лабыкин, И. Н. Кручинин, Э. Р. Ахтямов и др. // Системы Методы Технологии. 2023. № 4 (60). С. 147–154. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-147-154; EDN: WQOILY

18. Richmond P. W., Blaisdell G. L., Green C. E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Report 90-13. // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. 40 p.

Статья поступила в редакцию 16.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 28.01.2025

Информация об авторах

КРУЧИНИН Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – разработка и исследования устойчивости функционирования транспортно-производственных систем, повышение структурной прочности дорожных конструкций из малопрочных каменных материалов, совершенствование инструментального контроля при строительстве и содержании автомобильных дорог. Автор 250 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN-код: 6484-3424

БУРМИСТРОВА Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, метрологии и лесопромышленных технологий, Ухтинский государственный технический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. Автор 309 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN-код: 1301-0911

ЗАДВОРНОВ Виталий Юрьевич – инженер кафедры автомобильных дорог и мостов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9501-9884>

ОТЕВ Кирилл Сергеевич – старший преподаватель кафедры электроэнергетики, метрологии и лесопромышленных технологий, Ухтинский государственный технический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. Автор 58 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>; SPIN-код: 5214-2883

Вклад авторов:

Кручинин И. Н. – разработка программы, методики.

Бурмистрова О. Н. – концепция, постановка цели и задач, подготовка и редактирование статьи.

Задворнов В. Ю. – программное обеспечение, проведение эксперимента.

Отёв К. С. – проверка данных, подготовка и редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630.90

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>

EDN: NTNPIR

Development of Methods for Assessing Winter Road Surfaces of Forest Roads**I. N. Kruchinin¹, O. N. Burmistrova², V. Yu. Zadornov³, K. S. Otev²**¹Ural State Forest Engineering University,

37, Sibirsky Tr., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Ukhta State Technical University,

13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky Prosp., Perm, 614000, Russian Federation

otev.kirill@mail.ru

Abstract. *Introduction.* The article considers the problem of improving the methods for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads using a generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface of a forest road. The use of snow or snow-ice as a roadbuilding material causes significant difficulties in the operation of winter forest roads. This problem can be solved by the first developed assessment methodology based on a generalized indicator of the efficiency of the transport and operational condition of the winter road surface, which has determined the purpose of this work. *The purpose* of the research was to develop a methodology for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads. *Objects and methods.* The objects of the study are winter road surfaces of forest roads treated with stone friction materials. To investigate their performance, the methods of the theory of fuzzy logic and fuzzy sets were applied. *Results.* As a result of the conducted research, options of the treatment of winter road surfaces with friction materials have been developed. The following should be considered as the rational values for the treatment of winter road surfaces with stone friction materials: for fraction 5–10 mm with a distribution density of at least 6.5 kg/m²; for fraction 10–15 mm with a distribution density of at least 6.0 kg/m²; for fraction 10–20 mm with a distribution density of stone materials at least 9.0 kg/m², with a value of the generalized indicator of the transport and operational condition of at least 0.605. *Conclusion.* The developed methodology for assessing the transport and operational condition of winter road surfaces of forest roads according to a generalized indicator can be recommended to improve the efficiency of the operation of winter forest roads, as well as to develop regulations for the winter maintenance of forest transportation infrastructure.

Keywords: adhesion coefficient; dynamic modulus of deflection; friction materials; efficiency indicator; assessment method; fuzzy logic; fuzzy sets; road construction

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Kruchinin I. N., Burmistrova O. N., Zadornov V. Yu. et al. Development of Methods for Assessing Winter Road Surfaces of Forest Roads. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.73>; EDN: NTNPIR

REFERENCES

1. Galakhov N. N. Snow cover in the forest. *Meteorology and Hydrology.* 1940;(3):15–16. (In Russ.).
2. Alyabyev V. I., Ilyin B. A., Kuvaldin B. I. et al. Land transport of timber. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1990. 416 p. (In Russ.).
3. Morozov S. I., Pavlov F. A., Plaksa L. N. et al. Winter roads in the forestry industry. Moscow, Lesnaya Promyshlennost; 1969. 168 p. (In Russ.).
4. Afanasyev I. A., Kruchinin I. N. Winter maintenance of timber-hauling roads in the Ural region. *Monograph.* Perm: Perm State Technical University Publishing House; 2006. 135 p. (In Russ.).
5. Lee J. An Improved slip-based tire-snow interaction model for tire-snow interaction. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing.* 2011;4(1):278–288. DOI: 10.4271/2011-01-0188
6. Thompson M. P. Contemporary forest road management with economic and environmental objectives. Oregon State University, Pro Quest Dissertations Publishing; 2009. 284 p.
7. Korunov M. M. Accelerated method of building winter roads. Moscow, Goslestekhzdat, 1946. 34 p. (In Russ.).

8. Kuzmin P. P. Physical properties of snow cover. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1957. 179 p. (In Russ.).
9. Richter G. D. Snow cover, its formation and properties. Moscow, Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1945. 120 p. (In Russ.).
10. Mokhitev A. P., Goryaeva E. V., Mokhitev M. P. et al. Planning of operations of winter logging roads on the basis of analysis of climate data statistics. *Forestry Engineering Journal*. 2018;8(2(30)):176–185. DOI: 10.12737/article_5b2406175e7765.44768086; EDN: XRUBWP (In Russ.).
11. Kozhevnikov A. N., Belyakov V. V., Malygin V. A. et al. Equations for the relationship between snow condition parameters and their dependence on snow cover deformation. In: *Design, testing, operation and marketing of automotive and tractor equipment*. Collection of scientific papers dedicated to the 60th anniversary of the Department of Automobiles and Tractors. N. Novgorod: NNSTU, 1997:121–129. (In Russ.).
12. Kruchinin I. N., Labykin A. A., Oseichik D. V. et al. Device for forming a compacted snow cover. Patent for utility model, no. 219114; 2023. EDN: HKIWOM (In Russ.).
13. Shapiro L. H., Johnson J. B., Sturm M. et al. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. Report 97-3. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997. 36 p.
14. Vuori A. F. Mechanical properties of snow as a building material. In: *Physical methods for studying ice and snow*. Collection of works. Leningrad, Gidrometeoizdat; 1975. 118 p. (In Russ.).
15. Voitkovsky K. F. Mechanical properties of snow. Moscow, Nauka; 1977. 158 p. (In Russ.).
16. Labykin A. A., Kruchinin I. N., Pobedinsky V. V. et al. Assessment of the transport and operational condition of compacted snow cover of winter forest roads using neural networks. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost' (Woodworking Industry)*. 2023;(3): 3–10. EDN: HTENWN (In Russ.).
17. Labykin A. A., Kruchinin I. N., Akhtyamov E. R. et al. Improving methods of technological control of compacted snow cover during the construction and operation of winter forest transport infrastructure. *Systems, Methods, Technologies*. 2023;(4(60)):147–154. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-147-154; EDN: WQOILY (In Russ.).
18. Richmond P. V., Blaisdell G. L., Green K. E. Wheels and tracks in snow: Second validation study of the CRREL shallow snow mobility model. Report 90-13. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory; 1990. 40 p.

The article was submitted 16.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 28.01.2025

Information about the authors

Igor N. Kruchinin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Highways, Bridges and Tunnels; Ural State Forest Engineering University. Research interests – research and development of the sustainability of the functioning of transport and production systems; increasing the structural strength of road structures made of low-strength stone materials; improving the instrumental control in highway construction and maintenance. Author of 250 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN: 6484-3424

Olga N. Burmistrova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering, Metrology and Forestry Technologies; Ukhta State Technical University. Research interests – improving the reliability and efficiency of logging roads. Author of 309 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN: 1301-0911

Vitaly Yu. Zadornov – Engineer of the Department of Highways and Bridges; Perm National Research Polytechnic University. Research interests – improving the reliability and efficiency of logging roads. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9501-9884>

Kirill S. Otev – Senior Lecturer of the Department of Electric Power Engineering, Metrology and Forestry Technologies; Ukhta State Technical University. Author of 58 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3073-5090>; SPIN: 5214-2883

Contribution of the authors:

Kruchinin I. N. – development of the research program and methodology.

Burmistrova O. N. – research concept, setting the goal and objectives, preparing and editing the article.

Zadornov V. Y. – software, conducting the experiment.

Otev K. S. – data verification, preparing and editing the article.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.