



Научная статья

УДК 625.852

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-133-142

## Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог

**В.И. Клевко**, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; [vlivkl@mail.ru](mailto:vlivkl@mail.ru)

*Поступила в редакцию 18.12.23 / Одобрена после рецензирования 12.03.24 / Принята к печати 16.03.24*

**Аннотация.** Почти на всей территории лесных районов Российской Федерации в зимний период наблюдается промерзание грунтов. Воздействие отрицательных температур на пылевато-глинистые грунты становится причиной ряда неблагоприятных процессов, которые изменяют свойства самих грунтов. В число самых неблагоприятных из этих процессов входит накопление влаги в грунтах под влиянием перемещения фронта промерзания. При замерзании водонасыщенные глинистые грунты резко увеличиваются в объеме. Это приводит к появлению морозного пучения в активной зоне земляного полотна лесных дорог, что крайне негативно воздействует на конструкцию всей дорожной одежды и может повлечь за собой повреждение покрытия с резким ухудшением транспортно-эксплуатационных качеств лесных дорог. Для борьбы с морозным пучением необходимо изучение закономерностей изменения водно-теплового режима дорожных конструкций. Наибольшее значение для прогнозирования морозного пучения и разработки мероприятий по борьбе с этим явлением имеет глубина промерзания дорожной одежды и земляного полотна. В статье описаны разработанная система мониторинга температуры дорожной конструкции на глубину до 3 м и результаты измерений, позволяющие оценить изменение температуры на различной глубине от поверхности дороги и определить глубину промерзания. Всего было установлено 32 датчика с шагом 10 см. Выполнено численное моделирование процесса промерзания дорожной одежды и верхней части земляного полотна лесной дороги со сравнением результатов с показателями натуральных наблюдений. Выявлена хорошая сходимость данных. По итогам опытных исследований промерзание составило 173 см, численного моделирования – 190 см. Средняя погрешность результатов численного моделирования процесса промерзания покрытия и верхней зоны земляного полотна лесной дороги – 8–10 % по сравнению с опытными данными.

**Ключевые слова:** лесные дороги, глубина промерзания, тепловой режим, сезонное промерзание, численное моделирование промерзания, датчики температуры

**Для цитирования:** Клевко В.И. Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 133–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-133-142>

© Клевко В.И., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Original article

## Modeling the Thermal Regime of Road Pavement and Roadbed of Logging Roads

*Vladimir I. Kleveko*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolsky, 29, Perm, 614990, Russian Federation; [vlivkl@mail.ru](mailto:vlivkl@mail.ru)

---

*Received on December 18, 2023 / Approved after reviewing on March 12, 2024 / Accepted on March 16, 2024*

---

**Abstract.** Soil freezing is observed throughout almost the entire forested area of the Russian Federation in winter. The effect of negative temperatures on dusty-clay soils causes a number of adverse processes that change the properties of the soils themselves. One of the most unfavorable of these processes is the accumulation of moisture in soils under the influence of the movement of the freezing front. When freezing, water-saturated clay soils increase dramatically in volume. This leads to the appearance of frost heaving in the active zone of the forest roadbed, which has an extremely adverse effect on the structure of the entire pavement and can lead to damage to the pavement with a sharp deterioration in the transport and operational qualities of forest roads. To combat frost heaving, it is necessary to study the patterns of changes in the water-thermal regime of road structures. The depth of freezing of the pavement and the roadbed is of the greatest importance for predicting frost heaving and developing measures to combat this phenomenon. The article describes the developed system for monitoring the temperature of the road structure to a depth of 3 m and the measurement results which allow us to evaluate the temperature change at different depths from the road surface and determine the freezing depth. A total of 32 sensors have been installed with a step of 10 cm. A numerical simulation of the freezing process of the pavement and the upper part of the roadbed of a forest road has been performed, with the results compared with the indicators of field observations. Good data convergence has been revealed. According to the results of experimental studies, the freezing value has been 173 cm, and according to the results of numerical simulation – 190 cm. The average error in the results of numerical simulation of the freezing process of the pavement and the upper zone of the forest roadbed has been 8–10 % compared to the experimental data.

**Keywords:** forest roads, freezing depth, thermal regime, seasonal freezing, numerical freezing simulation, temperature sensors

**For citation:** Kleveko V.I. Modeling the Thermal Regime of Road Pavement and Roadbed of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 133–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-133-142>

### *Введение*

Лесная дорога состоит из целого комплекса различных взаимосвязанных конструктивных элементов. Надежность эксплуатации дороги зависит от безотказной работы ее составляющих. Напряженно-деформированное состояние активной зоны земляного полотна непосредственно влияет на дорожную одежду [1, 9]. Возникновение сил морозного пучения в грунте земляного полотна приводит к разру-



шению дорожной одежды. Для возникновения сил морозного пучения необходимо одновременное наличие 3 факторов: промерзание грунтов, пылевато-глинистые грунты в зоне промерзания и близко расположенные грунтовые воды. Кроме того, прочностные и деформационные характеристики пылевато-глинистых грунтов сильно зависят от влажности и значительно меняются по сезонам года [18, 23, 27]. Таким образом, воздействие климатических факторов, в основном температуры и влажности грунта, приводит к существенному изменению напряженно-деформированного состояния всей конструкции дорожной одежды и активной зоны земляного полотна лесных дорог [9–11, 13, 20, 21].

Срок службы дорожной одежды лесных дорог напрямую зависит от физико-механических свойств грунтов, расположенных в верхней части земляного полотна, на которые, в свою очередь, влияют температура и влажность [6, 12, 22, 25]. Наиболее опасным периодом года является период оттаивания сезонно-мерзлого слоя грунта. Анализ работы дорожных одежд, особенно в северных районах при неблагоприятных инженерно-геологических условиях, показывает, что в этот период происходят наибольшие разрушения и деформации, являющиеся главной причиной низких транспортно-эксплуатационных показателей лесных дорог [5, 7, 24, 26]. Климатические условия для районов России могут существенно различаться [10, 13–15, 17]. Поэтому необходимы проведение полевых исследований на стационарных пунктах наблюдений на территориях с сезоннопромерзающими грунтами и разработка региональных (местных) рекомендаций по проектированию и эксплуатации автомобильных дорог [4].

Цель исследования – оценка возможности использования численного моделирования для прогнозирования глубины промерзания дорожной одежды и активной зоны земляного полотна лесных дорог.

#### *Объекты и методы исследования*

Для изучения процессов промерзания грунтов с 2019 г. выполняются полевые исследования по мониторингу изменения температуры в дорожной конструкции на опытной площадке, расположенной в Пермском крае [4, 19].

Подробное описание опытной площадки и использованного оборудования приведено в работе [19]. Для погружения температурных датчиков в глубь грунтового массива применялась пластиковая трубка диаметром 50 мм и длиной 3000 мм. Внутри трубки были закреплены 32 датчика температуры на расстоянии 100 мм друг от друга. Датчики способны измерять температуру в диапазоне  $-55...+125$  °С.

В результате измерений были получены значения температуры в дорожной конструкции в течение осенне-зимнего периода 2021–2022 гг. (табл. 1).

Полевые исследования показали, что изучение особенностей работы водно-теплового режима дорожных конструкций лесных дорог представляет собой сложную задачу.

Анализ криогенных процессов в реальных условиях – очень трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому в последнее время находит широкое применение компьютерное моделирование процессов промерзания [2, 3, 8]. Существует ряд компьютерных программ, использующих метод конечных элементов и позволяющих решать задачи моделирования в грунтах [2, 3]. К ним можно отнести программные комплексы GeoStudio, COSMOS/M, ANSYS и др.

Одной из самых удобных программ является GeoStudio, которая предназначена для решения широкого комплекса геотехнических задач. В состав комплекса входит модуль Temp, учитывающий различные исходные данные и позволяющий моделировать процессы промерзания грунта земляного полотна и дорожной одежды лесных дорог.

Таблица 1

**Результаты измерения температуры дорожного полотна  
в осенний и зимний периоды**

**The results of roadbed temperature measurements in autumn and winter**

Глубина, м (номер датчика)	Температура, °С			
	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль
Над поверхностью (32)	-1,00	-3,00	-6,00	-9,50
0 (31)	-0,75	-2,25	-5,50	-9,50
0,1 (30)	-0,75	-2,25	-5,00	-5,75
0,2 (29)	-0,25	-2,00	-5,50	-5,25
0,3 (28)	0,25	-1,75	-5,25	-5,00
0,4 (27)	0,50	-1,50	-4,75	-4,50
0,5 (26)	0,65	-0,75	-4,25	-4,25
0,6 (25)	0,75	-0,50	-4,00	-4,00
0,7 (24)	0,75	-0,50	-3,75	-3,75
0,8 (23)	1,25	1,00	-3,25	-3,75
0,9 (22)	1,50	1,25	-1,85	-2,75
1,0 (21)	2,25	1,25	-1,75	-2,75
1,1 (20)	2,25	1,35	-1,50	-2,55
1,2 (19)	2,25	1,50	-1,35	-2,15
1,3 (18)	3,00	1,55	-1,25	-2,00
1,4 (17)	3,50	1,75	-0,95	-1,50
1,5 (16)	3,25	1,75	-0,70	-0,65
1,6 (15)	3,50	2,00	-0,50	-0,75
1,7 (14)	3,50	2,25	-0,25	-0,25
1,8 (13)	3,75	2,25	1,00	0,05
1,9 (12)	3,75	2,75	1,25	0,55
2,0 (11)	4,00	3,30	1,45	1,00
2,1 (10)	4,00	3,00	1,50	1,25
2,2 (9)	4,50	3,75	1,75	1,50
2,3 (8)	4,50	3,50	1,85	1,70
2,4 (7)	4,70	4,25	2,25	2,00
2,5 (6)	4,75	4,00	2,55	2,25
2,6 (5)	5,50	4,50	2,75	2,50
2,7 (4)	5,50	4,75	2,85	2,50
2,8 (3)	5,25	5,00	3,00	2,55
2,9 (2)	5,50	5,25	3,25	2,75
3,0 (1)	6,00	5,25	3,25	3,00

Граничные условия задавались для поверхности дороги и нижней линии модели: для поверхности – путем приложения к ней средней температуры воздуха в г. Перми за 2021–2022 гг. по архивным данным метеослужбы [16]; для нижней линии – постоянной во времени величиной, соответствующей постоянной температуре  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубине 11 м.

Значения теплопроводности материалов дорожной одежды и грунтов земляного полотна принимались по нормативным данным, приведенным в СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» и в приложении 5 МОН 2–2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд».

Программа GeoStudio TEMP/W позволяет выводить результаты расчета моделирования процесса промерзания на любую дату цикла расчета. На рис. 1 представлены примеры расчета на конкретные дни (1 ноября, 1 декабря, 1 января и 1 февраля) цикла моделирования.

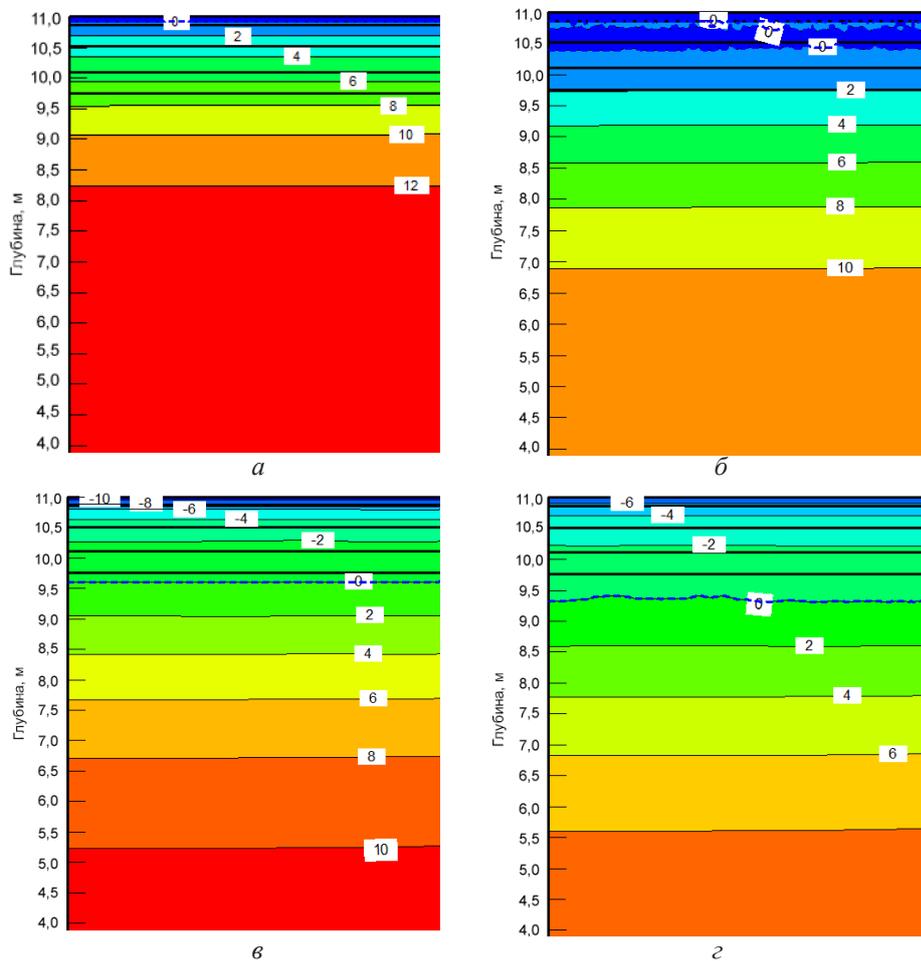


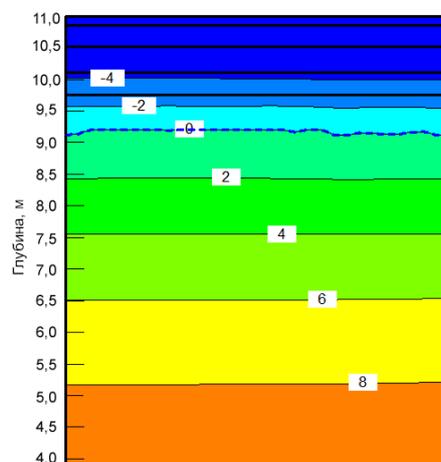
Рис. 1. Общий вид изотерм при моделировании процесса промерзания дорожного полотна в программе GeoStudio: *a* – на 1 ноября (глубина промерзания 0,1 м); *б* – на 1 декабря (глубина промерзания 0,6 м); *в* – на 1 января (глубина промерзания 1,4 м); *г* – на 1 февраля (глубина промерзания 1,7 м)

Fig. 1. The general view of the isotherms when modeling the process of roadbed freezing in the GeoStudio program: *a* – on November 1 (freezing depth 0.1 m); *b* – on December 1 (freezing depth 0.6 m); *v* – on January 1 (freezing depth 1.4 m); *z* – on February 1 (freezing depth 1.7 m)

Максимальная глубина промерзания была отмечена 10 февраля и составила 1,9 м. Общий вид изотерм для этой даты представлен на рис. 2.

Рис. 2. Общий вид изотерм в программе GeoStudio при максимальной глубине промерзания дорожного полотна (1,9 м)

Fig. 2. The general view of the isotherms in the GeoStudio program at the maximum roadbed freezing depth (1.9 m)



#### Результаты исследования и их обсуждение

Для разработки мероприятий по борьбе с морозным пучением в первую очередь необходимы сведения о глубине промерзания грунта в активной зоне земляного полотна. При численном моделировании процесса промерзания грунтов была определена дата максимальной глубины перехода температуры через 0 °С. Для этой даты (10 февраля) было выполнено сравнение данных о распределении температуры по глубине, полученных численным моделированием и опытным путем (табл. 2).

Таблица 2

#### Сравнение опытных и расчетных значений температуры дорожного полотна The comparison of experimental and calculated values of the roadbed temperature

Глубина, м	Температура, °С	
	Опытные данные	Численный метод
0	-6,50	-6,00
0,1	-4,75	-5,80
0,2	-3,25	-5,50
0,3	-3,00	-5,30
0,4	-4,50	-5,00
0,5	-4,25	-4,80
0,6	-4,00	-4,50
0,7	-3,75	-4,40
0,8	-3,75	-4,30
0,9	0,75	-4,15
1,0	0,75	-3,90
1,1	4,25	-3,45
1,2	1,75	-3,00
1,3	0,00	-2,45

Окончание табл. 2

Глубина, м	Температура, °С	
	Опытные данные	Численный метод
1,4	3,50	-2,00
1,5	1,75	-1,60
1,6	4,75	-1,10
1,7	-0,25	-0,80
1,8	0,75	-0,30
1,9	1,25	0,00
2,0	4,00	0,20
2,1	1,25	0,50
2,2	4,50	0,80
2,3	1,00	1,10
2,4	5,00	1,40
2,5	0,25	1,70
2,6	2,50	2,00
2,7	2,15	2,25
2,8	2,25	2,50
2,9	2,25	2,75
3,0	3,00	3,00

Глубина промерзания грунта по опытным данным составила 1,73 м, а по результатам численного моделирования – 1,9 м. Таким образом, программный комплекс GeoStudio TEMP/W, реализующий метод конечных элементов, позволяет достаточно точно моделировать процессы промерзания и оттаивания земляного полотна и дорожной одежды автомобильных дорог. Полученная погрешность составила 8 %. Сравнение остальных значений температур показало, что средняя погрешность расчетов равняется 10–15 %.

#### Выводы

1. Результаты численного моделирования процесса промерзания дорожной одежды и активной зоны земляного полотна показали хорошую сходимость с данными опытных наблюдений за температурным режимом дорожных конструкций. Численное моделирование позволяет прогнозировать глубину промерзания с достаточной для практических расчетов точностью.

2. Точность прогноза глубины промерзания конструкций лесных дорог численными методами можно повысить путем использования в качестве исходных данных результатов опытных измерений теплофизических параметров материалов дорожной одежды и грунтов активной зоны земляного полотна.

3. Необходимо развивать сеть опытных участков для проведения полевых наблюдений за температурным режимом дорожных конструкций с целью получения объективных данных о глубине промерзания и разработки региональных рекомендаций по проектированию и эксплуатации лесных дорог.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Апталаев М.Н., Жалко М.Е. Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Трансп. сооружения. 2016. Т. 3, № 4. Ст. № 2. Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/02TS416.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Aptalaev M.N., Zhalko M.E. Effect of the Water-and-Thermal Regime of the Auto-Road Base on the Pavement State. *Transportnyye sooruzheniya* = Russian Journal of Transport Engineering, 2016, vol. 3, no. 4, art. no. 2. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/02TS416>

2. Богатырева Т.В. Моделирование промерзания грунта земляного полотна автомобильной дороги с использованием расчетных программных комплексов // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2020 г.: сб. тез. докл. Красноярск: Науч.-инновационный центр, 2021. С. 44–45.

Bogatyreva T.V. Modeling of Freezing of the Roadbed Soil Using Calculation Software Packages. *Annual National Scientific and Technical Conference of the Teaching Staff, Postgraduate Students and Students of the Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University Based on the Results of Research Work for 2020: Collection of Abstracts of the Reports*. Krasnoyarsk, Research and Innovation Centre, 2021, pp. 44–45. (In Russ.).

3. Бургутдинов А.М., Кашапова К.Р., Клевеко В.И., Моисеева О.В. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: ПНИПУ, 2015. С. 346–350.

Burgonutdinov A.M., Kashapova K.R., Kleveko V.I., Moiseeva O.V. Modeling Seasonal Freezing of the Roadbed. *Modernization and Scientific Research in the Transport Complex: Materials of Scientific and Practical Conf. with International Participation*. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2015, pp. 346–350. (In Russ.).

4. Бургутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 146–158.

Burgonutdinov A.M., Rudov S.E., Grigoriev I.V., Efimov D.S., Shvetsova V.V. Experimental Studies of the Thermal Regime in the Pavement Layers of Long-Distance Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 2, pp. 146–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-146-158>

5. Вырко Н.П., Ращупкин С.В. Влияние морозного пучения на состояние транспортных путей // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2002. № 10. С. 119–122.

Vyrko N.P., Rashchupkin S.V. The Influence of Frost Heaving on the Condition of Transport Routes. *Trudy BGTU. Seriya 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the BSTU. Series 2. Forest and Woodworking Industry, 2002, no. 10, pp. 119–122. (In Russ.).

6. Гаврилов Т.А., Хорошилов К.В., Колесников Г.Н. Сезонное промерзание лесовозной грунтовой дороги: моделирование условий появления поперечных трещин // Resources and Technology. 2018. Т. 15, № 3. С. 29–42.

Gavrilov T.A., Khoroshilov K.V., Kolesnikov G.N. Seasonal Freezing of a Logging Dirt Road: Modeling of Conditions of Transverse Cracks Emergence. *Resources and Technology*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 29–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2018.4201>

7. Жалко М.Е. Промерзание грунта, как причина ДТП на территории Пермского края // Интернет-журн. Науковедение. 2014. № 1(20). Ст. № 62. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/06TVN114.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Zhalko M.E. The Freezing of the Soil, as the Cause of Road Accidents in the Perm Region. *Internet-zhurnal Naukovedenie*, 2014, no. 1(20), art. no. 62. (In Russ.).

8. Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М. К вопросу процесса промерзания грунта с точки зрения математического моделирования // Теория и практика соврем. науки. 2021. № 12(78). С. 124–132.

Zhalko M.E., Burgonutdinov A.M. To the Issue of the Soil Freezing Process from the Point of View of Mathematical Modeling. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2021, no. 12(78), pp. 124–132. (In Russ.).

9. Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М. Влияние водно-теплового режима основания лесовозной автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Теория и практика соврем. науки. 2021. № 12(78). С. 133–140.

Zhalko M.E., Burgonutdinov A.M. Influence of Water-Thermal Regime of the Base of a Logging Road on the Condition of Road Clothing. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2021, no. 12(78), pp. 133–140. (In Russ.).

10. Золотарь И.А. Теоретические основы применения тонкодисперсных грунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых грунтов. М.: Транспорт, 1988. 134 с.

Zolotar' I.A. *Theoretical Foundations of the Use of Fine-Grained Soils for the Construction of Roadbeds in the Northern Regions of Permafrost Soils*. Moscow, Transport Publ., 1988. 134 p. (In Russ.).

11. Илларионов В.А., Слабиков В.С., Вайс К.Е. Исследование влияния природно-климатических условий Севера на строительство зданий и сооружений и автомобильных дорог // Науч. знание современности. 2017. № 4(4). С. 124–130.

Illarionov V.A., Slabikov V.S., Weiss K.E. Study of the Influence of Natural and Climatic Conditions of the North on the Construction of Buildings and Structures and Highways. *Nauchnoe znanie sovremennosti*, 2017, no. 4(4), pp. 124–130. (In Russ.).

12. Корсунский М.Б., Россовский П.Д., Волчанский Г.В. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог в районах сезонного промерзания // Труды СоюзДорНИИ. Вып. 13. М., 1966. С. 83–94.

Korsunskij M.B., Rossovskij P.D., Volchanskij G.V. Regulation of Water-Thermal Conditions of the Roadbed in Areas of Seasonal Freezing. *Trudy SoyuzDorNII*. Moscow, 1966, iss. 13, pp. 83–94. (In Russ.).

13. Краев А.Н., Пермитина Т.В., Завьялов В.А. Методы прогноза водно-теплового режима земляного полотна и основания автомобильной дороги на примере ЯНАО // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. / редкол.: М.Н. Чекардовский, Л.Н. Скипин, В.В. Воронцов, А.Е. Сбитнев. Т. I. Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2014. С. 32–40.

Kraev A.N., Permitina T.V., Zav'yalov V.A. Methods for Predicting the Water-Thermal Regime of the Roadbed and Foundation of a Highway Using the Example of the Yamal-Nenets Autonomous District. *Current Issues of Construction, Ecology and Energy Saving in Western Siberia: Collection of the Materials of the International Scientific and Practical Conference: in 3 vol.* Ed. board: M.N. Chekardovskij, L.N. Skipin, V.V. Vorontsov, A.E. Sbitnev. Tyumen, RIO TyumGASU, 2014, vol. 1, pp. 32–40. (In Russ.).

14. Лопашук А.В., Лопашук В.В., Ермолин В.Н. Регулирование водно-теплового режима автомобильных дорог Камчатского края с учетом региональных особенностей // Вестн. Евраз. науки. 2021. Т. 13, № 2. Ст. № 8. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/16SAVN221.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Lopashuk A.V., Lopashuk V.V., Ermolin V.N. Kamchatka Krai Highways Water-Thermal Regime Regulation. *Vestnik Evraziyskoy nauki* = The Eurasian Scientific Journal, 2021, vol. 13, no. 2, art. no. 8. (In Russ.).

15. Никитина О.В. Факторы развития процессов морозного пучения, сезонного набухания и оттаивания грунтов на автомобильных дорогах Чувашской Республики // Естественнонауч. исследования в Чувашии. 2015. № 2. С. 81–84.

Nikitina O.V. Factors in the Development of Frost Heaving, Seasonal Swelling and Thawing of Soils on Highways in the Chuvash Republic. *Estestvennonauchnyye issledovaniya v Chuvashii*, 2015, no. 2, pp. 81–84. (In Russ.).

16. Погода России. Режим доступа: <http://meteo.infospace.ru/> (дата обращения: 08.12.23).

Russia's Weather. Available at: <http://meteo.infospace.ru/> (accessed: 08.12.23). (In Russ.).

17. Сапелкин Р.С., Меерсон В.Э., Меерсон М.В., Скряпников А.В., Казачек М.Н. Особенности районов строительства лесовозных автомобильных дорог // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 3. С. 30–43.

Sapelkin R.S., Meerson V.E., Meerson M.V., Skrypnikov A.V., Kazachek M.N. Features of Regions for Forest Roads Construction. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6323>

18. Сергеев А.С., Юшков Б.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды // *Трансп. сооружения*. 2014. Т. 1, № 1(1). Ст. № 2. Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (дата обращения: 11.09.24).

Sergeev A.S., Yushkov B.S. On the Freezing of Clay Soil and Water Migration into the Pavement Design. *Transportnyye sooruzheniya* = Russian Journal of Transport Engineering, 2014, vol. 1, no. 1, art. no. 2. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/02TS114>

19. Burgonutdinov A.M., Kleveko V.I. Monitoring of Changes in the Thermal Regime in the Road Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, art. no. 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012047>

20. Gates J.B., Scanlon B.R., Mu X., Zhang L. Impacts of Soil Conservation on Groundwater Recharge in the Semi-Arid Loess Plateau, China. *Hydrogeology Journal*, 2011, vol. 19, pp. 865–875. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0716-3>

21. Huo S., Jin M., Liang X., Lin D. Changes of Vertical Groundwater Recharge with Increase in Thickness of Vadose Zone Simulated by One-Dimensional Variably Saturated Flow Model. *Journal of Earth Science*, 2014, vol. 25, pp. 1043–1050. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>

22. Ibrahim M., Favreau G., Scanlon B.R., Seidel J.L., Coz Le M., Demarty J., Cappelaere B. Long-Term Increase in Diffuse Groundwater Recharge Following Expansion of Rainfed Cultivation in the Sahel, West Africa. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, iss. 6, pp. 1293–1305. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1143-z>

23. Jong de G., Kouwenhoven M., Bates J., Koster P., Verhoef E., Tavasszy L., Warffemius P. New SP-Values of Time and Reliability for Freight Transport in the Netherlands. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, vol. 64, pp. 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.008>

24. Kouwenhoven M., Jong de G.C., Koster P., Berg van den V.A.C., Verhoef E.T., Bates J., Warffemius P.M.J. New Values of Time and Reliability in Passenger Transport in the Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 2014, vol. 47, pp. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.017>

25. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, iss. 3, pp. 678–694.

26. Kurtzman D., Scanlon B.R. Groundwater Recharge through Vertisols: Irrigated Cropland vs. Natural Land, Israel. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, iss. 2, pp. 662–674. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0109>

27. Peer S., Koopmans C.C., Verhoef E.T. Prediction of Travel Time Variability for Cost-Benefit Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, vol. 46, iss. 1, pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.016>

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest