

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства  
и переработки древесины

Научная статья  
УДК 624.138.232  
doi: 10.28983/asj.y2024i6pp150-156

**Тепловая карта технико-экономической эффективности  
строительства лесовозных дорог**

**Сергей Александрович Чудинов**

Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена методика разработки тепловой карты технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в сравнении с применением каменных материалов. В основе математического аппарата заложены модели интеллектуальных систем в виде нейронечетких сетей для расчета сметной стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог в зависимости от дальности транспортировки материалов дорожных одежд от 30 до 500 км со средней абсолютной ошибкой МАРЕ менее 0,15 %. С использованием разработанной тепловой карты возможно производить оперативный и высокоточный анализ технико-экономической эффективности от 0 до 66 % по территории Свердловской области.

**Ключевые слова:** тепловая карта; экономическая эффективность; стоимость строительства; фиброцементогрунт; лесовозная автомобильная дорога

**Для цитирования:** Чудинов С. А. Тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных дорог // Аграрный научный журнал. 2024. № 6. С. 150–156. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp150-156>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Heat map of technical and economic efficiency  
of construction of logging roads**

**Sergey A. Chudinov**

Ural State Forestry University, Ekaterinburg, Russia.  
e-mail: chudinovsa@m.usfeu.ru

**Abstract.** The article discusses the methodology for developing a heat map of the technical and economic efficiency of constructing logging roads from fiber cement soil in comparison with the use of stone materials. The mathematical apparatus is based on models of intelligent systems in the form of neuro-fuzzy networks for calculating the estimated cost of construction of logging roads depending on the distance of transportation of road pavement materials from 30 to 500 km with an average absolute error MAPE of less than 0.15 %. Using the developed heat map, it is possible to perform a rapid and highly accurate analysis of technical and economic efficiency in the range from 0 to 66 % for the territory of the Sverdlovsk region.

**Keywords:** heat map; economic efficiency; construction cost; fiber cement soil; logging road

**For citation:** Chudinov S. A. Heat map of technical and economic efficiency of construction of logging roads. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(6):150–156. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp150-156>.

**Введение.** Лесовозные автомобильные дороги являются одним из основных элементов транспортной инфраструктуры, обеспечивающей функционирование и развитие лесопромышленной отрасли. Автомобильные дороги должны иметь нормативные транспортно-эксплуатационные показатели в течение всего срока службы, поэтому важной задачей является обоснованное конструирование, расчет и выбор строительных материалов для устройства слоев дорожных одежд, соответствующих местным природно-климатическим, геологическим и гидрометеорологическим условиям лесной зоны, с учетом минимальной сметной стоимости работ.

Каменные материалы: щебень, гравий, щебеночно-песчаные смеси, гравийно-песчаные смеси – являются традиционно используемыми строительными материалами для устройства дорож-



ных одежд лесовозных автомобильных дорог. Данные материалы технологичны в производстве и имеют высокие прочностные показатели, однако стоимость их применения в значительной степени зависит от транспортных затрат на доставку до объекта строительства. В связи с тем, что в лесосырьевых базах существует недостаток мест производства каменных материалов, их применение ограничено в связи с высокими транспортными затратами.

В данных условиях перспективным является применение технологии строительства дорожных одежд из укрепленных грунтов. Укрепленный грунт представляет собой смесь местного природного грунта с добавками вяжущего материала, например, портландцемента, и воды в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 [2]. Устройство цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных автомобильных дорог позволяет обеспечить их высокие прочностные показатели и морозостойкость при незначительных транспортных затратах на компоненты состава [1, 7, 10]. Однако недостаточная трещиностойкость цементогрунтовых слоев ограничивает сферу их применения, особенно на распространенных в лесной зоне слабых основаниях земляного полотна [8].

Эффективным решением проблемы повышения трещиностойкости цементогрунтов в условиях слабых оснований лесной зоны является технология дисперсного армирования волокнами фибры [11, 14]. Волокна фибры, удерживаясь в цементогрунтовой матрице воспринимают за счет своего осевого растяжения внешние нагрузки и увеличивают физико-механические показатели фиброцементогрунта [9]. В качестве добавки фибры могут быть использованы базальтовые, стеклянные, полипропиленовые или углеродные волокна [12, 13].

Применение фиброцементогрунта обеспечивает не только высокую несущую способность и долговечность конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, но и низкие транспортные затраты при строительных работах, поскольку в качестве основного компонента используется местный грунт при незначительном содержании добавок портландцемента, фиброволокна и воды.

Учитывая различную конъюнктуру рынка каменных материалов и компонентов фиброцементогрунтовых смесей, сравнение альтернативных вариантов конструкций дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги должно основываться не только на результатах прочностных расчетов, но и на сметной стоимости работ. В связи с этим разработка тепловой карты, позволяющей в любой ее точке с высокой точностью получить значение технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта, является актуальным вопросом.

Цель исследования – разработка тепловой карты технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог с конструкцией дорожной одежды из фиброцементогрунта в сравнении с конструкцией дорожной одежды из каменных материалов на территории Свердловской области.

**Материалы и методы.** Разработка тепловой карты технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области проводилась в следующей последовательности.

1. Конструирование и расчет двух альтернативных равнопрочных конструкций дорожных одежд лесовозной автомобильной дороги III-л категории в условиях Свердловской области в соответствии с ПНСТ 542-2021 [5] на основе каменных материалов и фиброцементогрунта в программном комплексе «КРЕДО РАДОН». Полученные параметры конструкций дорожных одежд представлены в таблице 1.

2. Лабораторный подбор состава фиброцементогрунтовой смеси по ГОСТ 70452-2022 [2], соответствующей марке по прочности М60 и коэффициенту морозостойкости 0,91 при 15 циклах замораживания – оттаивания для II дорожно-климатической зоны. Приготовление фиброцементогрунтовой смеси производилось на основе природного грунта – суглинка тяжелого песчанистого, взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области. В результате был получен состав в следующем соотношении компонентов фиброцементогрунтовой смеси: портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 [3] – 7 % от массы сухого грунта; фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области – 1,5 % от массы сухого грунта.

3. Расчет объемов работ по строительству 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории с конструкциями дорожных одежд из каменных материалов и фиброцементогрунта (таблица 2).

4. Проведение конъюнктурного анализа поставщиков на территории Свердловской области с получением данных о местонахождении, номенклатуре и стоимости выпускаемых материалов: песка, щебня, портландцемента и базальтового фиброволокна.



Таблица 1 – Параметры конструкций дорожных одежд

Table 1 – Parameters of road pavement structures

№ слоя	Наименование материала слоя	Расчетная толщина слоя, см
Параметры конструкции дорожной одежды из фиброцементогрунта		
1	Фиброцементогрунт, марка по прочности М60, ГОСТ 70452-2022	63
2	Суглинок легкий	–
Суммарная толщина конструкции дорожной одежды из фиброцементогрунта		63
Параметры конструкции дорожной одежды из каменных материалов		
1	Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 мм с заклинкой фракционным мелким щебнем	26
2	Щебень трудноуплотняемый фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 мм с заклинкой фракционным мелким щебнем	30
3	Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 5 % ГОСТ 32824-2014	20
4	Суглинок легкий	–
Суммарная толщина конструкции дорожной одежды из каменных материалов		76

Таблица 2 – Показатели объемов работ по строительству 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории с дорожной одеждой из фиброцементогрунта и из каменных материалов

Table 2 - Indicators of the volume of work for the construction of 1 km of the III-l category logging highway with road pavement made of fiber cement soil and stone materials

№ п/п	Наименование работ	Единица измерения	Объем
Дорожная одежда из фиброцементогрунта			
1	Разработка грунта 2 группы бульдозером мощностью 79 кВт с перемещением до 10 м	м <sup>3</sup>	2310
2	Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг; масса базальтовой фибры = 62658,75 кг)	м <sup>2</sup>	5500
3	Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг, масса базальтовой фибры = 62658,75 кг)	м <sup>2</sup>	5500
4	Укрепление грунта толщиной 21 см смешением с портландцементом и с базальтовой фиброй навесными фрезами (масса портландцемента = 161122,5 кг, масса базальтовой фибры = 62658,75 кг)	м <sup>2</sup>	5500
Дорожная одежда из каменных материалов			
1	Разработка грунта 2 группы бульдозером мощностью 79 кВт с перемещением до 10 м	м <sup>3</sup>	1320
2	Устройство дополнительного слоя основания из песка средней крупности	м <sup>2</sup>	5500
3	Устройство основания из щебня фр. 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклинкой мелким щебнем	м <sup>2</sup>	5500
4	Устройство покрытия из щебня фр. 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклинкой мелким щебнем	м <sup>2</sup>	5500
5	Устройство обочин из разработанного грунта	м <sup>2</sup>	2520
		м <sup>3</sup>	1320

5. Расчеты сметной стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории с конструкциями дорожных одежд из фиброцементогрунта и каменных материалов. Сметные расчеты произведены базисно-индексным методом с применением федеральной сметно-нормативной базы ФСНБ-2001 в редакции 2020 года (с Изм. 1–9) [6] в программе ГРАНД-Смета в соответствии с Методикой определения сметной стоимости строительства [4], в текущем уровне цен на III квартал 2023 года, в зависимости от различных вариантов транспортно-логистической схемы доставки материалов: щебня, песка, портландцемента и базальтовой фибры. В расчет приняты следующие средние расстояния доставки материалов от места производства до объекта строительства лесовозной автомобильной дороги: щебень, портландцемент: 30 км; 50 км; 100 км; 150 км; 200 км; 250 км; 300 км; 350 км; 400 км; 450 км; 500 км.

песок, базальтовая фибра: 30 км; 100 км; 200 км; 300 км; 400 км; 500 км.

Кроме того, в расчет приняты следующие стоимости дорожно-строительных материалов в текущем уровне цен:



щебень: 2079 руб./м<sup>3</sup>;

песок: 1210 руб./м<sup>3</sup>;

портландцемент: 10000 руб./т;

базальтовая фибра (фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит): 3000 руб./т.

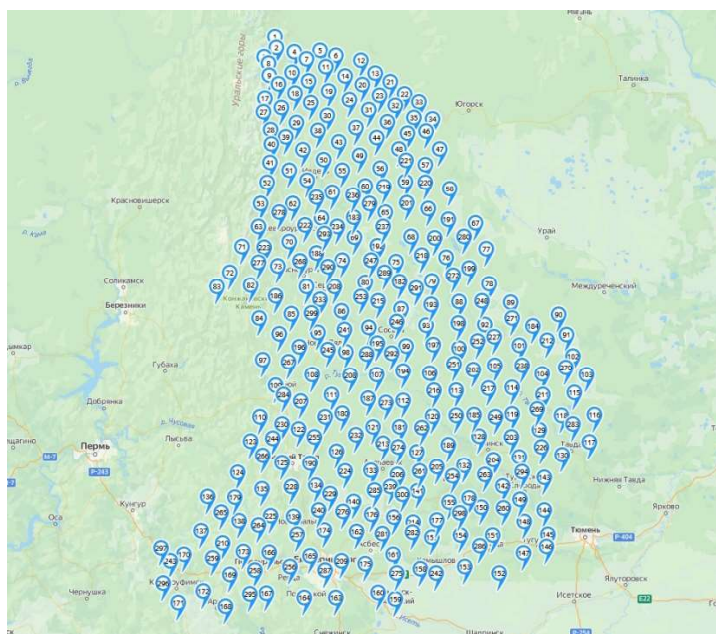
6. Разработка нейронечетких сетей в среде Matlab по определению стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории в условиях Свердловской области с конструкциями дорожной одежды из фиброцементогрунта и из щебня и песка, в зависимости от различной дальности возки материалов от 30 до 500 км [15]. Разработка моделей интеллектуальных систем производилась в следующей последовательности: 1) обоснование входных и выходной переменных для интеллектуальной системы; 2) обоснование типа интеллектуальной системы; 3) разработка обучающих выборок для настройки нейросети; 4) программная реализация нейронной сети в среде Matlab; 4) обучение нейронной сети и проверка адекватности на тестовых примерах.

В результате были разработаны нейронечеткие сети, которые позволяют производить расчеты стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории в условиях Свердловской области в зависимости от дальности возки материалов дорожных одежд в диапазоне расстояний от 30 до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE менее 0,15 %.

7. Разработка в программном комплексе AutoCAD картографической основы территории Свердловской области с нанесением производителей портландцемента, щебня, песка и базальтового волокна.

8. Равномерное распределение на картографической основе территории Свердловской области матрицы из 300 точек тяготения грузопотоков со средним расстоянием друг от друга 19,5 км.

9. Расчет для всех точек матрицы тяготения грузопотоков минимального расстояния доставки материалов от ближайших производителей портландцемента, щебня, песка и базальтового волокна. Расчет транспортной схемы доставки материалов осуществлялся с учетом существующей сети автомобильных дорог общего пользования с использованием картографической поисково-информационной системы «Яндекс Карты» (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Матрица точек тяготения грузопотоков на территории Свердловской области**

**Figure 1 – Matrix of points of gravity of cargo flows on the territory of the Sverdlovsk region**

10. С использованием разработанных нейронечетких сетей для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области, в зависимости от параметров транспортной схемы доставки материалов, произведен расчет стоимости строительства 1 км лесовозной автомобильной дороги III-л категории с различными конструкциями дорожной одежды: из фиброцементогрунта и из щебня и песка. С учетом полученных стоимостных данных, для каждой



точки матрицы тяготения грузопотоков, произведен расчет экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта по формуле:

$$\Xi = \frac{Z_{до1} - Z_{до2}}{Z_{до1}} \cdot 100 \%,$$

где  $\Xi$  – экономический эффект от строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта, %;  $Z_{до1}$  – стоимость строительства лесовозной автомобильной дороги из каменных материалов, тыс. руб./1 км;  $Z_{до2}$  – стоимость строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта, тыс. руб./1 км.

Фрагмент полученных данных стоимости и экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области представлен в таблице 3.

**Таблица 3 – Фрагмент данных стоимости и экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области**

**Table 3 – Fragment of data on the cost and economic efficiency of the construction of logging roads from fiber cement soil at the points of the gravity matrix of freight flows in the territory of the Sverdlovsk region**

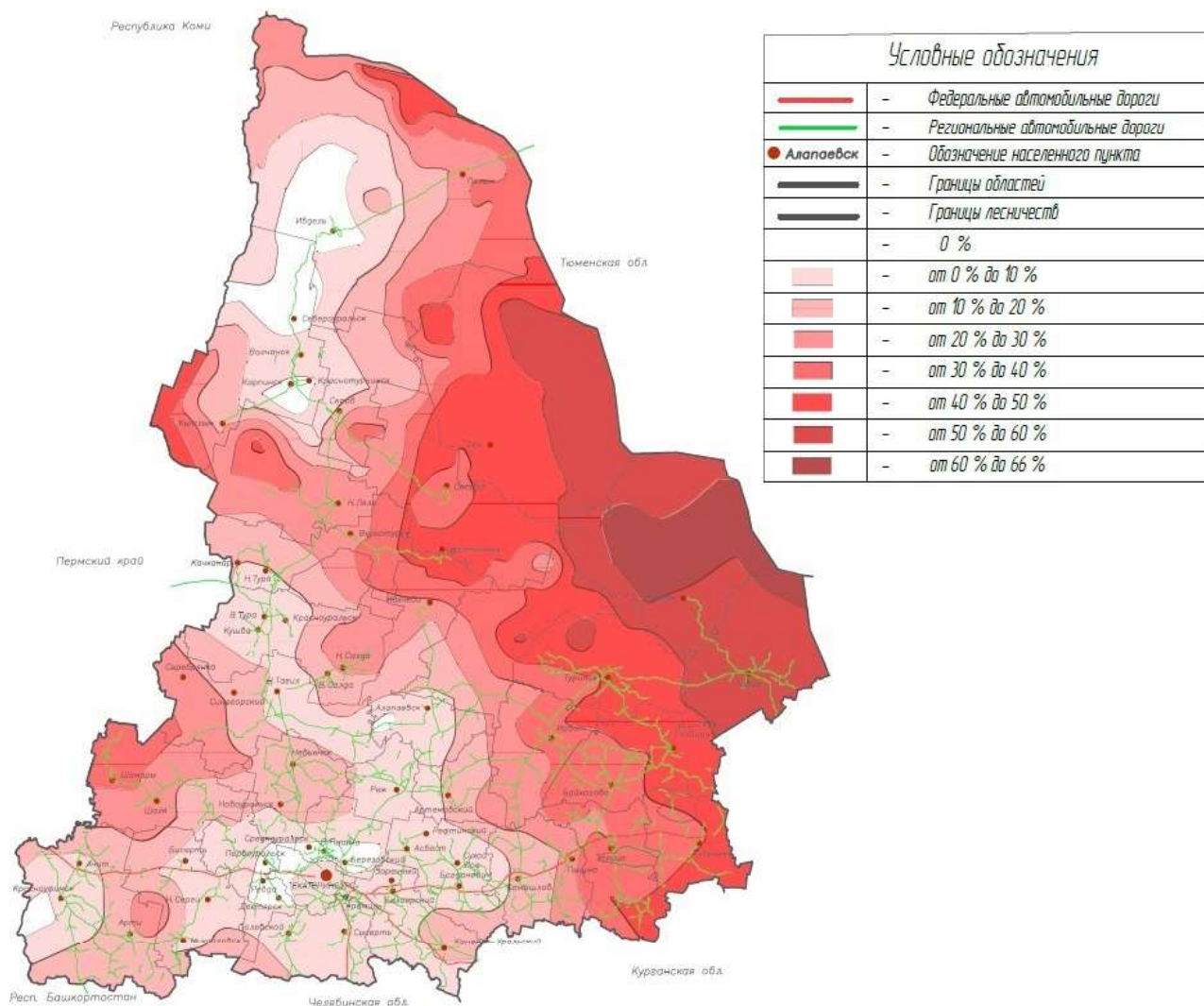
№ точки	Расстояние доставки от ближайшего производителя				Стоимость строительства		Экономический эффект от строительства из фиброцементогрунта, %
	Портландцемент	Базальтовая фибра	Щебень	Песок	из фиброцементогрунта, тыс. руб./1 км	из каменных материалов, тыс. руб./1 км	
1	500	465	127	232	10881	15423	29,4
2	500	458	119	218	10875	14970	27,4
3	500	463	110	230	10879	14760	26,3
4	500	436	104	202	10856	14230	23,7
5	500	431	97	197	10852	13911	22,0
6	500	500	264	328	10910	21598	49,5
7	500	450	97	209	10868	14041	22,6
8	500	460	61	218	10876	12779	14,9
9	500	455	89	193	10872	13566	19,9
10	500	412	78	177	10836	12977	16,5
11	500	413	77	179	10837	12961	16,4
12	500	500	243	305	10910	20570	47,0
13	500	500	242	306	10910	20542	46,9
14	500	423	85	187	10845	13350	18,8
15	500	407	68	158	10832	12394	12,6
16	500	417	73	177	10840	12788	15,2
17	500	411	77	175	10835	12918	16,1
18	500	391	56	155	10818	11908	9,2
19	500	394	54	156	10821	11844	8,6
20	500	500	253	318	10910	21080	48,2

11. Интерполяция показателей экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области, вычерчивание в программном комплексе AutoCAD границ и выделение цветных областей тепловой карты технико-экономической эффективности (рисунок 2).

**Результаты исследований.** Проведенные исследования позволили установить, что производители дорожно-строительных материалов: щебня, песка, портландцемента и базальтовой фибры, расположены не равномерно по территории Свердловской области. Средние расстояния доставки материалов до объектов строительства лесовозных автомобильных дорог по Свердловской области составляют: щебень: 137,56 км; песок: 161,20 км; портландцемент: 313,49 км; базальтовая фибра: 249,01 км.

Средняя стоимость строительства лесовозной автомобильной дороги III-л категории из каменных материалов на территории Свердловской области составляет: 15073,65 тыс. руб./ 1 км. Средняя стоимость строительства лесовозной автомобильной дороги III-л категории из фиброцементогрунта – 10291,41 тыс. руб./ 1 км. Учитывая изложенное, средний экономический эффект от строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта для Свердловской области составляет 31,7 % относительно использования в дорожной одежде каменных материалов.





**Рисунок 2 – Тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области**

**Figure 2 – Heat map of the technical and economic efficiency of the construction of logging roads from fiber cement soil in the Sverdlovsk region**

Однако, в зависимости от параметров транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов, показатели технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта распределены по территории Свердловской области неравномерно и изменяются от 0 до 66 %. Так, в границах Березовского лесничества показатели технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта изменяются от 0 до 20 %, а в границах Таборинского лесничества показатели технико-экономической эффективности изменяются от 50 до 66 %.

**Закключение.** Разработана тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области на основе нейронечетких сетей для расчета сметной стоимости в зависимости от дальности возки материалов дорожных одежд в диапазоне расстояний от 30 до 500 км со средней абсолютной ошибкой  $MARE$  менее 0,15 %.

Результаты исследований позволили установить, что строительство лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта для условий Свердловской области имеет экономический эффект в среднем 31,7 % по сравнению с традиционно используемыми дорожными одеждами из каменных материалов.

С помощью тепловой карты возможно производить оперативный и высокоточный анализ технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта от 0 до 66 % на территории Свердловской области, позволяя сократить сроки проектирования и выбрать обоснованные технические решения конструкций дорожной одежды, снизив сметную стоимость строительно-монтажных работ.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Научные исследования. 2018. № 6. С. 23–25.
2. ГОСТ Р 70452-2022. Грунты стабилизированные и укрепленными неорганическими вяжущими. Общие технические условия. Введ. 30.11.2022. М.: Институт стандартизации, 2022. 24 с.
3. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 30.04.2020. М: Стандартинформ. 2020. 19 с.
4. Методика определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации», утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.08.2020 № 421/пр. Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/74853>.
5. ПНСТ 542-2021. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Введ. 18.05.2021. М.: Стандартинформ, 2021. 77 с.
6. ФСНБ-2001. Федеральная сметно-нормативная база ценообразования в строительстве в редакции 2020 года (с Изм. 1–9). URL: [https://gk-infostroy.ru/bd\\_nsi/fsnb](https://gk-infostroy.ru/bd_nsi/fsnb).
7. Чудинов С.А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
8. Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
9. Чудинов С.А. Фиброцементогрунтовая смесь. Патент 2785742. Оpubл. 12.12.2022. Бюл. № 35. 9 с.
10. Чудинов С.А., Черняк Р.Д., Дмитриев В.Н., Байц О.Н. Опытнo-производственные исследования применения золошлаковых отходов в дорожном строительстве // Дороги и мосты. 2022. № 2 (48). С. 254–273.
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers // Geomech Eng. 2020. No. 22. P. 227–236.
12. Ayeldeen M., Azzam W., Arab M.G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement // Geotech Geol Eng. 2022. No. 40. P. 1873–1885.
13. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures // Soils Found. 2019. No. 59. P. 2144–2154.
14. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl // Geotech Geol Eng. 2023. No. 3. P. 1–15.
15. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, 2001. 760 p.

## REFERENCES

1. Voskanyants K.E. Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction. Scientific Research. 2018;(6):23–25. (In Russ.).
2. GOST R 70452-2022. Soils stabilized and strengthened with inorganic binders. General technical conditions. Enter. 11/30/2022. Moscow, 2022. 24 p. (In Russ.).
3. GOST 31108-2020. General construction cements. Technical conditions. Enter. 04/30/2020. Moscow, 2020. 19 p. (In Russ.).
4. Methodology for determining the estimated cost of construction, reconstruction, major repairs, demolition of capital construction projects, work to preserve cultural heritage sites (historical and cultural monuments) of the peoples of the Russian Federation on the territory of the Russian Federation,” approved by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 04.08.2020 No. 421/pr. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/74853>. (In Russ.).
5. PNST 542-2021. Non-rigid road pavements. Design rules. Enter. 05/18/2021. Moscow, 2021. 77 p. (In Russ.).
6. FSNB-2001. Federal estimate and regulatory framework for pricing in construction as amended in 2020 (from Amendments 1–9). Available at: [https://gk-infostroy.ru/bd\\_nsi/fsnb](https://gk-infostroy.ru/bd_nsi/fsnb). (In Russ.).
7. Chudinov S.A. Reinforced soils in the construction of logging roads. Ekaterinburg, 2020. 174 p. (In Russ.).
8. Chudinov S.A. Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex. Ekaterinburg, 2022. 164 p. (In Russ.).
9. Chudinov S.A. Fiber cement soil mixture. Patent RF, no. RU 2 785 742. 2022. No. 35. 3 p. (In Russ.).
10. Chudinov S.A., Chernyak R.D., Dmitriev V.N., Bajz O.N. Pilot research on the use of ash and slag waste in road construction. Roads and Bridges. 2022;2(48):254-273. (In Russ.).
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M.F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. Geomech Eng. 2020;(22):227–236.
12. Ayeldeen M., Azzam W., Arab M.G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement. Geotech Geol Eng. 2022;(40):1873–1885.
13. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. Soils Found. 2019;(59):2144–2154.
14. Godoy V.B., Tomasi L.F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl. Geotech Geol Eng. 2023;(3):1–15.
15. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag. 2001. 760 p.

*Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 13.02.2024.  
The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 13.02.2024.*

