

## Разработка модели интеллектуальной системы контроля качества уплотнения асфальтобетонной смеси для катков

*А.П. Прокопьев*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Аннотация:** Рассмотрена задача построения модели интеллектуальной системы непрерывного контроля плотности асфальтобетонной смеси для вибрационных катков. Методология, теоретические основы построения таких систем для дорожных машин рассмотрены автором ранее в авторских публикациях. Предложены четыре модели функциональных зависимостей показателей качества уплотнения от переменных динамических параметров системы. Представлен алгоритм, реализующий предложенный метод, а также научные результаты, полученные на основе измеренных сигналов вибрационных параметров в полевом экспериментальном исследовании при строительстве верхнего слоя асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Научные результаты получены на основе анализа данных переменных во временной области.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, нечеткая нейронная сеть, асфальтовый каток.

Достижения в области микроэлектроники и фотоники, сетей интернет, интернета вещей, мобильной связи (5G), глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС), ВМ технологий, киберфизических систем, цифровых двойников, автономных систем, распространяются во многих отраслях, в том числе в дорожном строительстве [1]. Повышение производительности в дорожном строительстве, увеличение срока службы асфальтобетонных (АБ) покрытий автомобильных дорог являются актуальными народно-хозяйственными проблемами.

Уплотнение верхних слоев АБ покрытий выполняют асфальтоукладчики (АУ) и дорожные катки (ДК) разных типов: легкие; средние; тяжелые. Для повышения эффективности (качества покрытий и производительности строительства) в работе [2] предложена модель киберфизической дорожно-строительной системы. Для повышения качества дорожных покрытий, эффективности управления рабочими процессами, АУ и ДК оснащаются системами автоматического контроля (САК) плотности АБ

---

смеси. Учитывая необходимость обработки большого объема данных переменных вибрационных параметров, получаемых и обрабатываемых контроллерами, эффективными инструментами для решения этих задач используются технологии вычислительного интеллекта (ВИ) [3, 4]. В авторской работе [5] представлены теоретические основы построения интеллектуальных систем контроля и управления плотностью АБ смесей для использования на АУ и ДК.

Цель исследования: построение модели интеллектуальной САК плотности АБ смеси для вибрационных катков на базе технологий ВИ.

В качестве базовой информации используются данные переменных, полученные в результате проведения полевого эксперимента во время строительства верхнего слоя АБ покрытия толщиной 0,05 м в Емельяновском районе Красноярского края в августе–сентябре 2021 г.

При строительстве верхнего слоя АБ дорожного покрытия формирование прочной и устойчивой структуры асфальтобетона обеспечивается в результате многократного статического и/или вибрационного приложения нагрузки вальцами ДК, которое сопровождается увеличением сопротивления АБ смеси деформированию.

Традиционно ДК уплотняет АБ смесь до требуемой плотности в зависимости от исходной плотности после уплотнения АУ за 6 ÷ 10 проходов по одной полосе при постепенном охлаждении температуры смеси от 120 ÷ 140°C до 70 ÷ 80°C. Требуемые нормы коэффициента уплотнения: 0,99 для щебенистых плотных смесей; 0,98 – малощебенистых, песчаных и пористых, 0,96 – для покрытий из любых смесей на тротуарах [6, 7]. Эффективность ручного управления режимными параметрами ДК в значительной степени зависит от квалификации и опыта машиниста, а также субъективных факторов. Высокая эффективность работы ДК обеспечивается автоматизацией контроля и управления плотностью АБ смеси, при этом

---

устраняются недостатки ручного управления. Современный подход к построению САК плотности АБ смесей для вибрационных ДК строится на базе нейросетевых структур [8 - 10].

Входные переменные. Переменные, определяемые на основе сигналов акселерометра – показатели во временной области:  $a_{rms}$  – среднеквадратичное значение ускорения вибрационного вальца,  $\text{м/с}^2$ ;  $a_p$  – максимальное абсолютное значение ускорения вибрационного вальца,  $\text{м/с}^2$ .

Выходная переменная. Выходной переменной принимается величина коэффициента уплотнения  $K_y$  АБ смеси, которая является достаточно информативной и определяет основное назначение будущего дорожного покрытия.

Формально построение модели САК плотности для катков с вибрационными вальцами предложено представить следующими зависимостями:

$$K_y = \theta(\text{Type}, h_a, t_a, V_r, \text{Pass}, f_d, a_{rms}(a_p)) ,$$

$$K_y = \theta(\text{Type}, h_a, t_a, V_r, \text{Pass}, F_0, a_{rms}(a_p)) ,$$

где  $\text{Type}$  – тип смеси;  $h_a$  – толщина слоя, м;  $t_a$  – температура поверхности АБ смеси,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_r$  – скорость движения, км/ч;  $\text{Pass}$  – проход катка;  $f_d$  – частота колебаний вибратора вальца катка, Гц.

Анализ данных переменных вибропараметров катка позволил включить для использования при разработке возможных вариантов интеллектуальной САК плотности переменные:  $x_1 - \text{Pass}$ ;  $x_2 - a_p$ ;  $a_{rms}$ ;  $x_3 - F_0$ .

Предложено для разработки интеллектуальной САК плотности для ДК использовать нечеткие нейронные сети (ННС), которая должна обладать способностью приобретать знания о поведении динамического объекта контроля и непрерывно прогнозировать уплотненность АБ смеси. Необходимым требованиям соответствуют ННС типа адаптивная нейро-

нечеткая система (англ. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS), архитектура и назначение слоев которой рассмотрены в работе [11].

Постановка задачи. Построить модель интеллектуальной САК плотности АБ смеси на базе ННС типа ANFIS MISO-системы, которая состоит из нескольких входных и одной выходной переменных, заданных функциями принадлежности (ФП).

Для решения поставленной задачи предложены 4 варианта моделей ННС САК плотности, см. рис. 1, отличающиеся данными переменных вектора входного слоя сети ANFIS.

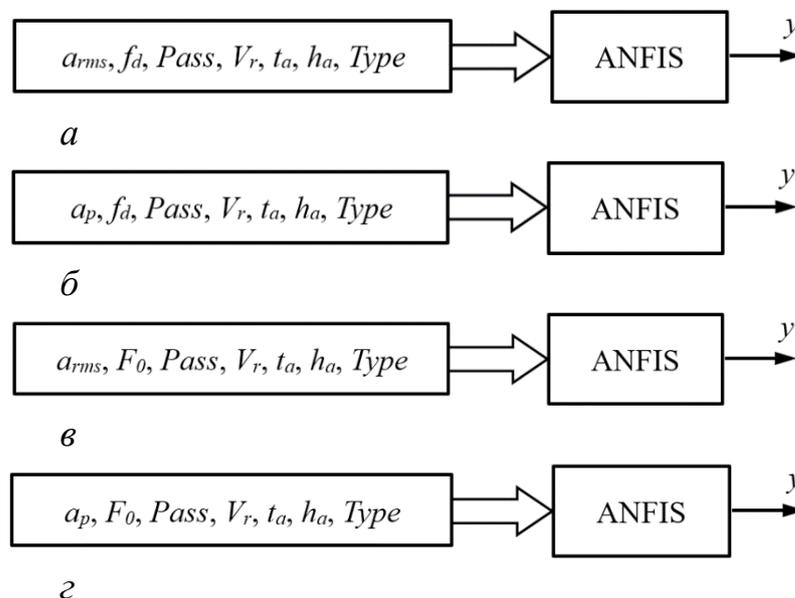


Рис. 1. Модели ННС САК плотности для вибрационных катков:  
*a* – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 3; *з* – вариант 4

Предложен алгоритм построения модели ННС САК плотности для вибрационных катков на базе среды MATLAB/Simulink.

Этап 1. Обработка и анализ набора исходных данных переменных, полученных в полевом эксперименте группой исследователей СФУ [12].

Этап 2. Выбор структуры ННС типа ANFIS.

Этап 3. Загрузка ANFIS-редактора в среде MATLAB.

Этап 4. Загрузка файла обучающей выборки с расширением \*.dat.

Этап 5. Подготовка исходной системы нечеткого логического вывода.

Этап 6. Запуск обучения ННС типа ANFIS.

Этап 7. Тестирование сети.

Этап 8. Сохранение файла построенной системы с расширением \*.fis.

Этап 9. Выполнение компьютерного моделирования интеллектуальной САК плотности. Анализ результатов.

Результаты исследования.

Выполнена предобработка данных переменных входного слоя моделей ННС ANFIS. Нормирование величины  $x$  в интервале  $[x_{\min}, x_{\max}]$  заключается в приведении его к нормированному интервалу  $[-1, 1]$  путем подходящего масштабирования.

Выходная переменная ННС – коэффициент уплотнения, не нормируется.

Построение ННС типа ANFIS MISO-системы на основе программной среды MATLAB/Simulink выполняется с использованием встроенного инструмента – редактора anfisedit. В результате обработки и процедуры предобработки получен набор данных переменных процесса вибрационного уплотнения АБ смеси плотной типа А марки I в форме компьютерных файлов с расширением \*.dat, который включал обучающую (ОВ) и тестовую выборки в пропорции 75% и 25%, соответственно.

Данные переменных сформированы в электронных таблицах MS EXCEL в виде столбцов. Правый столбец таблицы содержит значение выходной переменной. Фрагменты ОВ данных переменных представлены в табл. 1 ÷ 4.

При построении моделей ННС типа ANFIS, для всех вариантов САК плотности, переменные определялись треугольными (trimf), трапециевидными (trapmf), колоколообразными (gbellmf), гауссовыми (gaussmf) и двухсторонними гауссовыми (gauss2mf) ФП. Обучение ННС

---

выполнялось гибридным методом. Выбор лучшей модели интеллектуальной САК плотности осуществлялся на основе метрики корень среднеквадратичной ошибки (англ. Root Mean Squared Error, RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \rightarrow \min,$$

где  $y_i$  – множество обучаемых данных;  $\hat{y}_i$  – расчетные данные;  $n$  – количество точек в обучаемой выборке.

Результаты исследования и их обсуждение.

Построены 4 варианта модели ННС типа ANFIS для САК плотности: ANFIS<sub>1Roller</sub>; ANFIS<sub>2Roller</sub>; ANFIS<sub>3Roller</sub>; ANFIS<sub>4Roller</sub>.

Модель ННС ANFIS<sub>1Roller</sub>. Две переменные входного слоя – количество проходов катка  $Pass$ , среднеквадратичное значение ускорения вибрационного вальца  $a_{rms}$ , три ФП. Система нечеткого вывода содержит 9 нечетких правил.

Итоговые результаты обучения модели ННС представлены в табл. 5. Лучшая точность получена при использовании колоколообразной (gbellmf) ФП, количество эпох 20, метрика RMSE = 0,002668.

Аналогично выполнено построение и исследование для 2-го, 3-го и 4-го вариантов моделей ННС САК- плотности.

Проверка адекватности построенных моделей в среде программы MATLAB/Simulink выполняется в окне «Просмотрщика Правил» (англ. Rule Viewer) графического интерфейса, см. рис. 2, а также визуализации поверхности (англ. Surface Viewer) нечеткого вывода, см. рис. 3,

Проблемы использования ННС для построения моделей САК связаны с ограничениями в рассмотренных диапазонах переменных. За пределами этих диапазонов переменных, для прогнозирования плотности АБ смеси, требуется обучение на основе дополнительного набора данных переменных по рассмотренной методике. Значительным достоинством при построении

---

модели интеллектуальной САК плотности АБ смеси является обучаемость ННС типа ANFIS.

Таблица 1

Данные переменных ОВ (фрагмент), вариант 1

$Pass_N$	$a_{rmsN}, \text{M/c}^2$	$K_v$
-0,50	-0,207	0,966
-0,50	-0,166	0,961
-0,50	-0,124	0,965
-0,50	-0,137	0,963
-0,17	-0,178	0,974
-0,17	-0,169	0,974
-0,17	-0,210	0,975
-0,17	-0,169	0,97

Таблица 2

Данные переменных ОВ (фрагмент), вариант 2

$Pass_N$	$a_{pN}, \text{M/c}^2$	$K_v$
0,17	0,09	0,984
0,17	0,30	0,984
0,17	0,22	0,985
0,17	0,16	0,986
0,50	0,33	0,985
0,50	0,40	0,996
0,50	0,28	0,991
0,50	0,37	0,992

Таблица 3

Данные переменных ОВ (фрагмент), вариант 3

$Pass_N$	$F_{0N}$	$a_{rmsN}, \text{M/c}^2$	$K_v$
0,17	0,00	0,12	0,984
0,17	0,00	0,31	0,984
0,17	0,00	0,32	0,985
0,17	0,00	0,19	0,986
0,50	0,50	0,40	0,985
0,50	0,50	0,36	0,996
0,50	0,50	0,45	0,991
0,50	0,50	0,34	0,992

Таблица 4

Данные переменных ОВ (фрагмент), вариант 4

$Pass_N$	$F_{0N}$	$a_{pN}, \text{M/c}^2$	$K_v$
-0,50	-0,50	-0,22	0,966
-0,50	-0,50	-0,21	0,961
-0,50	-0,50	-0,16	0,965
-0,50	-0,50	-0,20	0,963

-0,17	0,00	-0,24	0,974
-0,17	0,00	-0,23	0,974
-0,17	0,00	-0,25	0,975
-0,17	0,00	-0,26	0,97

Таблица 5

### Структурная информация ANFIS<sub>1Roller</sub>

Тип параметров ANFIS	ANFIS <sub>1Roller</sub> (1)	ANFIS <sub>1Roller</sub> (2)	ANFIS <sub>1Roller</sub> (3)	ANFIS <sub>1Roller</sub> (4)	ANFIS <sub>1Roller</sub> (5)
Количество входных переменных	2				
Тип ФП	треугольная (trimf)	трапециевидная (trapmf)	колоколообразная (gbellmf)	гауссова (gaussmf)	гауссова двухсторонняя (gauss2mf)
Тип выходной ФП	линейная (linear)				
Количество ФП входного слоя	3*3				
Обучающая выборка	84				
Тестовая выборка	21				
Количество эпох	2	2	20	35	5
Количество узлов	35	35	35	35	35
Количество линейных параметров	27	27	27	27	27
Количество нелинейных параметров	18	24	18	12	24
Общее количество параметров	45	51	45	39	51
Количество нечетких правил	9	9	9	9	9
Комбинация входа	$Pass_N, a_{rmsN}$				
RMSE	0.002732	0.002751	0.002668	0.002694	0.002740

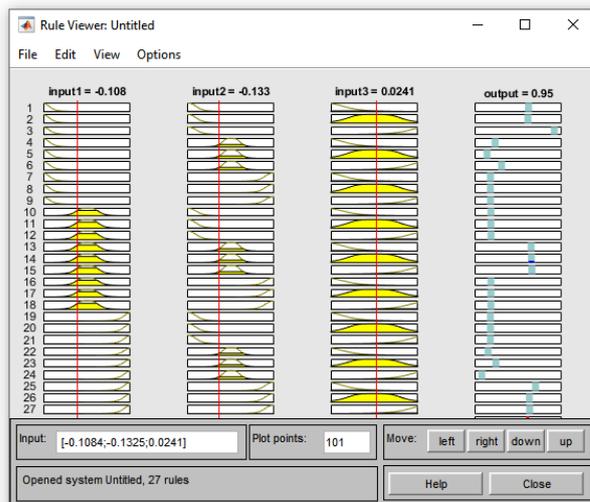


Рис. 2. Окно Rule Viewer с решения задания для варианта исходных данных переменных

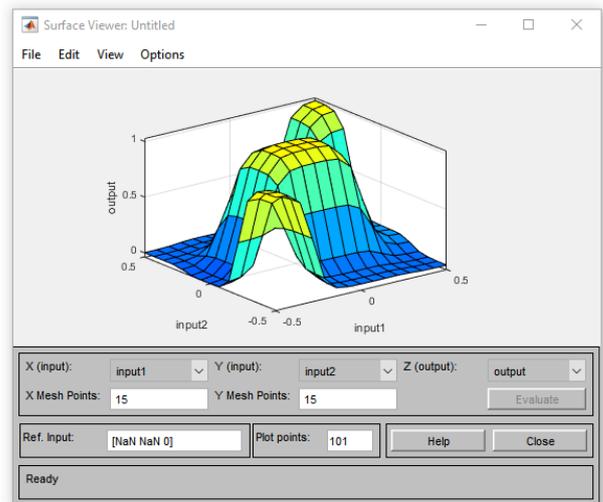


Рис. 3. Окно Surface Viewer нечеткого вывода для первой  $Pass$  и второй  $F_0$  входных переменных

В результате исследования получены четыре оптимальные модели ННС типа ANFIS, имеющие различные переменные во входном слое. Все варианты предложенных ННС типа ANFIS показали хорошую точность. Проведено моделирование полученных вариантов ННС на базе тестовых примеров в среде программы MATLAB. Определены относительные ошибки результатов моделирования. Результаты моделирования приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты моделирования ННС типа ANFIS<sub>iRoller</sub>

Модель ANFIS	Переменные входного вектора	Функция принадлежности	RMSE	Относительная ошибка (максимальное значение), %
ANFIS <sub>1Roller(3)</sub>	$Pass_N, a_{rmsN}$	колоколообразная (gbellmf)	0.002668	0,61
ANFIS <sub>2Roller(4)</sub>	$Pass_N, a_{pN}$	гауссова (gaussmf)	0.002625	2,50
ANFIS <sub>3Roller(3)</sub>	$Pass_N, F_{0N}, a_{rmsN}$	колоколообразная (gbellmf)	0.002732	0,60
ANFIS <sub>4Roller(3)</sub>	$Pass_N, F_{0N}, a_{pN}$	колоколообразная (gbellmf)	0.002727	0,50

Максимальные значения относительной ошибки для моделей ННС ANFIS<sub>1Roller(3)</sub>, ANFIS<sub>3Roller(3)</sub>, ANFIS<sub>4Roller(3)</sub> меньше 1%, для модели ANFIS<sub>2Roller(4)</sub> – 2,5%, что соответствует хорошей точности модели.

Методические подходы к построению модели интеллектуальной САК плотности АБ смеси на базе ННС дополняют друг друга и дают возможность смягчить проявления недостатков искусственных нейронных сетей.

Выводы. В работе предложен методический подход к построению модели интеллектуальной САК плотности АБ смеси для вибрационных катков. Новизна подхода заключается в предложенных 4-х новых моделях интеллектуальных САК плотности для катков, которые обеспечивают прогнозирование плотности АБ смесей с ошибкой меньше 3%.

Применение интеллектуальной системы контроля плотности для вибрационных катков позволит значительно повысить эффективность управления плотностью АБ смеси на базе «помощника» машиниста,

непрерывно информирующего его о текущих значениях плотности, а также потенциального уменьшения числа проходов катков, что обеспечивает снижение финансовых затрат на уплотнение. Эти факторы оказывают значительное влияние на качество и срок службы АБ дорожных покрытий.

### Литература

1. Романенко И.И. Автоматизация дорожно-строительных работ при применении информационных систем и 3D моделей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214).
2. Прокопьев А.П. Киберфизическая система для управления отрядом дорожных машин в инфраструктурных проектах автомобильного транспорта // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848).
3. Xu G., Chang G.K., Wang D., Correia A.G., Nazarian S. The pioneer of intelligent construction—An overview of the development of intelligent compaction // Journal of Road Engineering. 2022. 2. PP. 348 - 356. DOI: 10.1016/j.jreng.2022.12.001.
4. Zhan Y., Zhang Y., Nie Z., Luo Zh., Qiu S., Wang J., Zhang A.A., Ai Ch., Tang X., Tan Ch. Intelligent paving and compaction technologies for asphalt pavement // Automation in Construction. 2023. Vol.156. P. 105081. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105081.
5. Прокопьев А.П. Теоретические основы построения интеллектуальных систем управления уплотнением асфальтобетонных смесей // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10 (часть 1). С. 48 - 58. DOI: 10.17513 /snt.39345.
6. Костельов И.П., Пахаренко Д.В. Чем уплотнять асфальтобетон в покрытиях при смене его типа, состояния и толщины слоя // Дорожная техника: каталог-справочник. Санкт-Петербург: Славутич, 2007. С. 70 - 85.

7. Костельов М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброркатков для уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника: каталог-справочник. Санкт-Петербург: Славутич, 2009. С. 42 - 52.

8. Xue Z., Cao W., Liu S., et al. Artificial Neural Network-Based Method for Real-Time Estimation of Compaction Quality of Hot Asphalt Mixes // Applied Sciences. 2021. No. 11. P. 7136.

9. Wang X., Cheng C., Li J., et al. Automated monitoring and evaluation of highway subgrade compaction quality using artificial neural networks // Automation in Construction. 2023. Vol. 145 (3). P. 104663.

10. Wang X., Cheng C., Zhang J., et al. Real-time monitoring and quality assessment of subgrade compaction: key factors and ANN model // Acta Geotechnica. 2023. No. 18. PP. 3349-3366.

11. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system // IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics. 1993. Vol. 23. No. 3. PP. 665 - 684.

12. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Янаев Е.Ю., Турышева Е.С., Потапов А.Е. Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465).

### References

1. Romanenko I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214).

2. Prokop'ev A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848).

3. Xu G., Chang G.K., Wang D., Correia A.G., Nazarian S. Journal of Road Engineering. 2022. 2. PP. 348 - 356.



4. Zhan Y., Zhang Y., Nie Z., Luo Zh., Qiu S., Wang J., Zhang A.A., Ai Ch., Tang X., Tan Ch. Automation in Construction. 2023. Vol. 156. P. 105081.
5. Prokop'ev A.P. Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. 2022. № 10 (chast`1). PP. 48 - 58.
6. Kostel`ov M.P., Paxarenko D.V. Dorozhnaya tekhnika: katalog-spravochnik. Sankt-Peterburg: Slavutich, 2007. PP. 70 - 85.
7. Kostel`ov M.P. Dorozhnaya tekhnika: katalog-spravochnik. Sankt-Peterburg: Slavutich, 2009. PP. 42 - 52.
8. Xue Z., Cao W., Liu S., et al. Applied Sciences. 2021. No. 11. P. 7136.
9. Wang X., Cheng C., Li J., et al. Automation in Construction. 2023. Vol. 145 (3). P. 104663.
10. Wang X., Cheng C., Zhang J., et al. Acta Geotechnica. 2023. No. 18. PP. 3349 - 3366.
11. Jang J.-S.R. IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics. 1993. Vol. 23. No. 3. PP. 665 - 684.
12. Prokop`ev A.P., Emel`yanov R.T., Yanaev E.Yu., Tury`sheva E.S., Potapov A.E. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2022. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465).

**Дата поступления: 2.07.2024**

**Дата публикации: 10.08.2024**