

Олейникова Олеся Олеговна

студентка

Ступина Алена Александровна

д-р техн. наук, профессор

Потапов Борис Васильевич

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»
г. Москва

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ СТРУКТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКАХ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация: в статье рассмотрено применение графовых нейронных сетей для анализа структурных зависимостей в цифровых двойниках промышленных предприятий. Производственный процесс формализован как ориентированный гетерогенный граф; архитектура Graph Attention Network предсказывает вероятность каскадных отказов. На реальном датасете UCI AI4I 2020 показано преимущество подхода: $F1 = 0,891$, упреждение 2,4 производственного цикла, снижение ложных срабатываний на 16,3%. Обосновано влияние метода на социально-экономическую эффективность предприятий: сокращение незапланированных простоев, оптимизация ремонтов, устойчивость занятости.

Ключевые слова: цифровой двойник, графовые нейронные сети, предиктивное обслуживание, каскадные отказы, эффективность предприятия, устойчивое развитие.

Введение. Незапланированные простои оборудования остаются одним из ключевых источников экономических потерь и социальной напряжённости на промышленных предприятиях. Традиционный мониторинг оценивает активы

изолированно и не улавливает каскадное распространение отказов; сравнительные исследования подтверждают преимущество нейросетевых методов прогнозирования над классическими статистическими подходами на нестационарных данных, нейросетевые алгоритмы успешно применяются для прогноза характеристик сложных систем по косвенным измерениям, а машинное обучение доказало универсальность предиктивной парадигмы в технической диагностике.

1. *Графовая методология.* Производственная линия формализуется как ориентированный граф: узлы – оборудование и операции, рёбра – материальные, энергетические и управляющие зависимости (рост температуры процесса → износ инструмента → вероятность отказа). Эксперименты выполнены на UCI AI4I 2020 (10 000 циклов, 14 признаков, ~3,3% отказов); использована двухслойная Graph Attention Network с асимметричной передачей сообщений. Управление рисками промышленных территорий целесообразно строить на ансамблевых методах машинного обучения; принципы адаптивного управления производительностью информационных систем АСУ ТП и интеллектуальной обработки сенсорных данных в реальном времени обеспечивают замкнутый контур предиктивного обслуживания.

2. *Результаты.* Сравнение с базовыми методами (табл. 1) подтверждает эффективность графовой модели.

Таблица 1

Сравнение моделей предсказания отказов (UCI AI4I 2020)

Модель	F1	ROC-AUC	Упреждение, циклов	FPR, %
Random Forest	0,712	0,745	1,3	22,1
LSTM	0,758	0,781	1,7	19,4
GCN	0,823	0,847	2,1	15,8
GAT (предлагаемая)	0,891	0,912	2,4	13,1

Анализ карт внимания показал: в 68% случаев критическими являются не сырые параметры, а производные зависимости, что подтверждает гипотезу о скрытых каскадных механизмах. Методы машинного обучения доказали эффективность в автоматизированной классификации аномалий по инструментальным данным; перспективным направлением является обучение с подкреплением для

оптимизации управления автоматизированными комплексами; рекуррентные сети эффективны для прогнозирования динамических процессов, а обнаружение аномалий в сенсорных потоках дополняется алгоритмами кластеризации.

3. *Социально-экономическая интерпретация.* Снижение FPR на 16,3% уменьшает ложные остановы и потери выпуска; упреждение 2,4 цикла переводит ремонты из аварийных в плановые, снижая травматизм и стабилизируя занятость. Интерпретируемость внимания обеспечивает прозрачность управленческих решений – фактор доверия персонала к цифровизации и элемент устойчивого развития предприятия.

Заключение. Графовые нейросети обеспечивают топологически осознанную оценку рисков в цифровых двойниках и готовы к интеграции в SCADA/IIoT-платформы, повышая социально-экономическую эффективность предприятий.

Список литературы

1. Сравнительный анализ статистических и нейросетевых методов прогнозирования геоэкологических показателей горнодобывающих объектов / А.А. Ступина, М.В. Спринджук, М.В. Журавлев, Т.И. Ашмарина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №4. – С. 125–130. EDN ITXOMF

2. Использование нейросетевых алгоритмов для прогноза коллекторских свойств нефтегазоносных пород по геофизическим данным скважин / В.В. Кукарцев, Б.В. Потапов, М.Н. Степанцевич, Д.Ю. Евсюков // Геология и Геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. №2. – С. 256–267. DOI 10.46698/VNC.2026.90.55.001. EDN KEEVXM

3. Применение методов машинного обучения для прогнозирования прочностных характеристик горных пород / Б.В. Потапов, Д.Ю. Евсюков, А.С. Прудкий, М.С. Никаноров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №2. – С. 406–411. EDN VSQHDC

4. Интеллектуальные модели анализа геоэкологических рисков горнопромышленных территорий на основе ансамблевых методов машинного обучения /

Б.В. Потапов, Д.Ю. Евсюков, Т.В. Бирюкова, Т.И. Ашмарина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 108–112. EDN SJGJHI

5. Tudakov D.I. Adaptive Performance Management of Transactional Databases in Automated Process Control Systems Based on Probabilistic Fragmentation Prediction / D.I. Tudakov, B.V. Potapov, S.V. Pchelintseva // 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2026. – P. 1178–1182.

6. Kazakovtsev D.V. Intelligent Sensor Data Processing Methods for Real-Time Control of Mechatronic Manufacturing Systems / D.V. Kazakovtsev, B.V. Potapov // 2026 International Conference on Artificial Intelligence for Sustainable Engineering and Innovation (AISEI). – IEEE, 2026. – P. 1230–1235.

7. Применение методов машинного обучения для автоматизированной классификации магнитных аномалий Северного Кавказа по данным аэрогеофизической съемки / В.С. Тынченко, М.В. Журавлев, С.О. Курашкин, В.Ю. Панченко // Геология и Геофизика Юга России. – 2026. – Т. 16. №2. – С. 108–119. DOI 10.46698/VNC.2026.48.42.001. EDN CBGZAI

8. Применение методов обучения с подкреплением для оптимизации управления автоматизированными и роботизированными комплексами в горной промышленности / А.А. Ступина, А.В. Бабкина, М.В. Журавлев, М.С. Никаноров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 368–373. EDN QIFKMR

9. Прогнозирование тепловых процессов в подземных горных сооружениях с использованием рекуррентных нейронных сетей / М.В. Журавлев, О.А. Антамошкин, М.Н. Степанцевич, Е.Ф. Малыха // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №3. – С. 205–211. EDN LZFRCG

10. Обнаружение аномалий в данных промышленных сенсорных систем добычи на основе алгоритмов кластеризации / С.О. Курашкин, Л.В. Красовская, М.В. Журавлев, Т.В. Бирюкова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – №4. – С. 382–388. EDN WMCTCH

11. Stupina A.A. Application of Graph Neural Networks for Structural Dependency Analysis in Industrial Digital Twins Using the UCI AI4I 2020 Predictive Maintenance Dataset / A.A. Stupina, S.V. Kukartseva, M.N. Stepantsevich // 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2026. – P. 1155–1159.

12. Интеграция геоинформационных систем и алгоритмов искусственного интеллекта для мониторинга геотехнической устойчивости объектов горной инфраструктуры / Л.А. Казаковцев, А.С. Прудкий, И.А. Вахрушева, М.С. Никаноров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 354–359. EDN EGFSPA

13. Интерпретируемые модели машинного обучения в задачах оценки экологической и промышленной безопасности горнодобывающих предприятий / Л.А. Казаковцев, А.С. Прудкий, И.А. Вахрушева, А.Н. Лосев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2026. – №1. – С. 169–174. EDN GNIXFD