

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЭКОМОНИТОРИНГЕ

Кольцов В.Б.

д.хим.н., профессор, профессор института перспективных материалов и технологий

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «НИИ МИЭТ»,
Россия,*

г. Москва, Россия

Кондратьева О.В.

к.т.н., доцент, доцент кафедры системное программирование

*ФГБОУ ВО Московский Технологический Университет Связи и Информатики,
Россия, г. Москва*

Аннотация

Статья представляет собой комплексный анализ современного состояния использования нейронных сетей в задачах экологического мониторинга. Экологический мониторинг - система наблюдений, оценки, прогноза состояния окружающей среды. Традиционно опирается на детерминированные физико-химические модели, которые основаны на фундаментальных законах переноса и трансформации загрязняющих веществ. Цель исследования: создать систему мониторинга состояния окружающей среды на примере г. Москвы на базе технологии нейронных сетей. Методы исследования: собственная разработка включает полносвязную нейронную сеть, обученную методом градиентного спуска, интегрированную с промышленной SCADA с использованием базы данных. Результаты исследования: описан процесс сбора данных о состоянии атмосферного воздуха, отображения их в системе, продемонстрирована нейросетевая работа, направленная на прогнозирование уровня загрязнения атмосферы на заданной оператором высоте над уровнем моря.

Ключевые слова: экомониторинг, нейронные сети, SCADA, сенсорные системы, анализ спутниковых снимков.

NEURAL NETWORKS IN ECOMONITORING

Koltsov V.B.

Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Institute of Advanced Materials and Technologies

Federal State Educational Institution of Higher Education "National Research University "Research Institute of MIET",

Russia, Moscow

Kondratieva O.V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of System Programming,

Moscow Technological University of Communications and Informatics,

Moscow, Russia.

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of the current state of the use of neural networks in environmental monitoring tasks. Environmental monitoring is a system of observations, assessments, and forecasts of the state of the environment. Traditionally, it relies on deterministic physico-chemical models that are based on the fundamental laws of transport and transformation of pollutants. The purpose of the study: to create an environmental monitoring system based on the example of Moscow based on neural network technology. Research methods: our own development includes a fully connected neural network trained by gradient descent, integrated with industrial SCADA using a database. Research results: the process of collecting data on the state of atmospheric air is described, displaying them in the system, and neural network work is demonstrated aimed at predicting the level of atmospheric pollution at an altitude set by the operator above sea level.

Keywords: ecomonitoring, neural networks, SCADA, sensor systems, satellite image analysis.

Современный экологический мониторинг в последнее время сталкивается с проблемами, связанными с масштабной антропогенной нагрузкой на природную экосистему, нелинейную динамику климатических изменений и т.д. Нейронные сети с методами машинного обучения сделали возможным превращение большого массива данных в целостную картину происходящих на всей планете процессов, включая прогнозы, сценарии, а также инструменты принятия решений. В аспекте экологического мониторинга значительное распространение получили архитектуры нейронных сетей ИИ: сверточные нейронные сети «Convolutional Neural Networks», «CNN», эффективно решающие задачи пространственного анализа спутниковых, а также и аэроснимков, рекуррентные нейронные сети: «Recurrent Neural Networks», «RNN», их специализированные модификации: сети с долгой краткосрочной памятью «Long Short-Term Memory», «LSTM», которые предназначены для прогнозирования временных рядов концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, в том числе - трансформерные модели «Transformers» - высокоэффективные в работе с многомерными пространственно-временными данными, и гибридные архитектуры [3].

В данном исследовании представлено сравнение эффективности разных моделей машинного обучения, направленных на прогнозирование суточной концентрации взвешенных частиц на примере г. Москвы [4]. Спецификой метеорологических условий являются t^0C инверсии, которые создают устойчивые загрязненные слои в приземном атмосферном слое в зимний период. Результаты анализа показали, что модель «LSTM» «Long Short-Term Memory» на основе нейронной сети, обученная на данных с сезонным разделением, а также, дополненная метеорологическими параметрами, весьма превосходит по точности регрессионные, «ARIMA»/ «ARIMAX», ансамблевые, и бустинговые модели. Модель «LSTM» демонстрирует высокую прогнозную точность со значениями средней абсолютной ошибки $MAE \leq 1,63 \text{ мкг/м}^3$ и коэффициентом детерминации $= R^2 \geq 0,80$.

Разработанный программный комплекс планируется внедрить в систему экологического мониторинга Москвы и других промышленных городах [2].

Основываясь на рассмотренных подходах, в данном исследовании предложена собственная система контроля атмосферного воздуха, интегрирующая нейросетевое прогнозирование и «SCADA» систему. Первым этапом разработки нейронной сети является сбор данных для обучения. Проведены измерения метеорологических параметров, включая атмосферное давление, $t^{\circ}\text{C}$, влажность, скорость, направление ветра, а также сбор концентрации загрязняющих веществ: NO_2 , SO_2 , C_6H_6 в разную погоду, включая разные высоты. Измерения были выполнены в пределах высот от 116,8 до 136,8 м над уровнем моря, в соответствии с диапазоном от 0 до 20 м. от земной поверхности. Было зафиксировано: диоксид азота: от 0 до 1,28 $\text{мг}/\text{м}^3$; диоксид серы: от 0 до 0,04 $\text{мг}/\text{м}^3$, бензол: от 0 до 0,22 $\text{мг}/\text{м}^3$. Давление составляло: от 749,46 до 758,15 мм. рт. ст., влажность зафиксирована: от 30,1 до 50,8 %, $t^{\circ}\text{C}$ от 16,08 до 27,42, направление ветра: от 1,42 до 358,85, скорость ветра составляла – от 0,01 до 2,65 м/сек [1,5]. В целях разработки нейронной сети применялась интегрированная среда «PyCharm» на языке «Python», который обеспечил удобство создания, обучения модели глубокого обучения. «Keras» предоставлял простой интерфейс для последовательной сборки сетевых слоев через класс «Sequential». Определение архитектуры нейронной сети – был ключевым этапом. Входной слой сети принимал вектор метеорологических параметров, выходной слой выдавал прогнозируемые концентрации загрязняющих веществ. Оба слоя использовали сигмоидальную функцию активации. Для обучения использовался метод градиентного спуска. Число скрытых слоев, нейронов было подобрано эмпирически для обеспечения сходимости. Принципиальная схема архитектуры изображена на рис. 1 - условно, на базе последовательных полносвязных слоев.

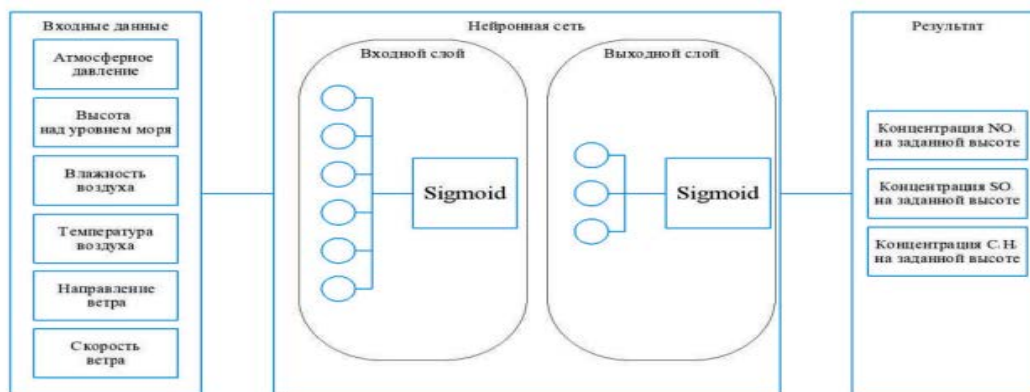


Рис. 1 – Архитектура нейронной сети

После завершения обучения были построены графики зависимости функции потерь и средней абсолютной ошибки «MAE» для обучающего, а также валидационного наборов данных в течение некоторого времени (рис. 2 и 3). Значения функции потерь плавно снижались к «0» без скачков, помех, что свидетельствовало об отсутствии переобучения. Аналогично, «MAE» равномерно уменьшается в течение всего обучения. Разработанная нейронная сеть признана работоспособной в целях составления прогнозов концентрации загрязняющих веществ на заданной высоте.

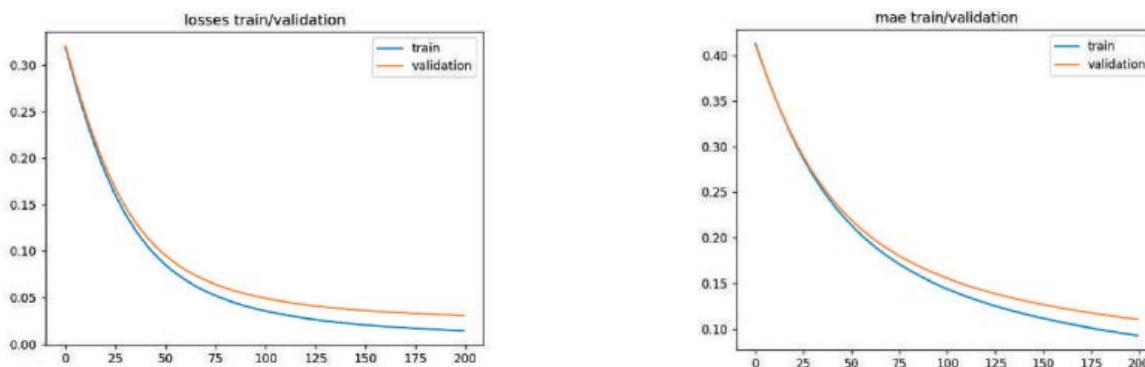


Рис. 2 (А, Б) – А. Зависимость значений функциональных потерь для обучающегося и валидационного набора данных; Б - Зависимость значений средней абсолютной ошибки для обучающегося и валидационного наборов с течением времени.

Для оперативного мониторинга и управления была выбрана «SCADA» система «Supervisory Control» and «Data Acquisition». В качестве среды разработки использовалась «Trace Mode 7». Были созданы - мнемосхема (рис. 3),

на которой отображались текущие значения метеопараметров с концентрациями на обеих высотах, а также окно прогноза (рис. 4), которое позволяло составлять прогноз изменения содержания загрязняющих веществ на разной высоте с помощью нейросети [2].

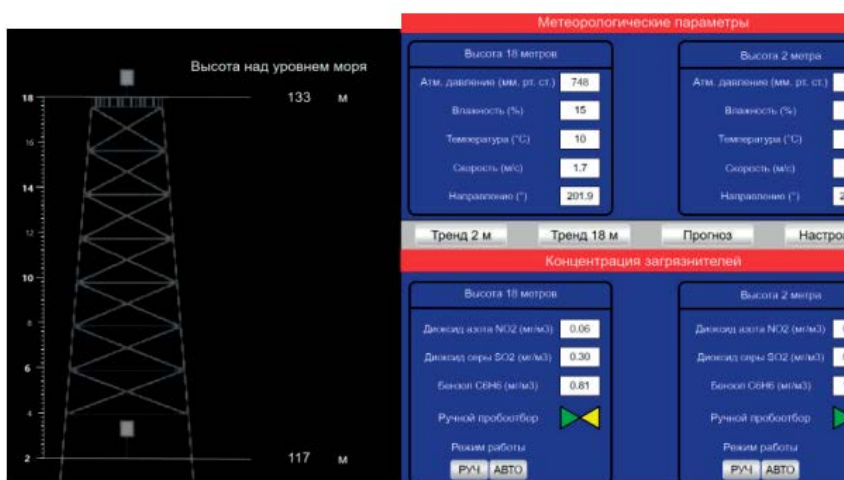


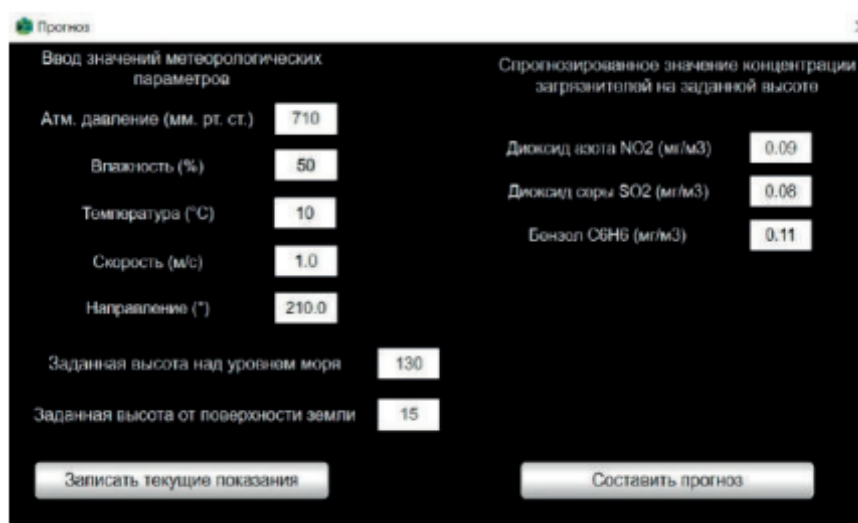
Рис. 3 – Мнемосхема экологического мониторинга атмосферы



Рис. 4 – Данные и алгоритм прогноза

Для интеграции SCADA-системы с нейронной сетью использовалась платформа «СУБД MS SQL Server». Связь была организована по схеме-алгоритму (рис.4) нейросеть, обученная в «Python», сохраняла прогнозные значения в таблицах баз данных, «SCADA» система через «ODBC» соединение считывала поступающие данные, отображая на мнемосхеме и в окне прогнозов. Обратный поток включал текущие измерения с контроллеров, поступающие в «SCADA», и далее в «БД», которые применяются для дообучения сети.

Результат отображения в системе расчетных концентраций загрязняющих веществ на заданной высоте при определенных погодных условиях (рис. 5). Система выдает прогноз для NO₂, SO₂, С6Н6 с дискретностью на высоте 5 м. Сравнение с натурными замерами показало среднюю относительную погрешность, составляющую не более 12 %, что в результате, подтверждает практическую применимость.



Ввод значений метеорологических параметров		Спрогнозированное значение концентрации загрязнителей на заданной высоте	
Атм. давление (мм. рт. ст.)	710	Диоксид азота NO ₂ (мг/м ³)	0.09
Влажность (%)	50	Диоксид серы SO ₂ (мг/м ³)	0.08
Температура (°C)	10	Бензол С6Н6 (мг/м ³)	0.11
Скорость (м/с)	1.0		
Направление (°)	210.0		
Заданная высота над уровнем моря	130		
Заданная высота от поверхности земли	15		

Рис. 5 - Результаты прогнозной оценки

Проведенный анализ современных исследований демонстрирует высокую эффективность нейросетевых методов в экологическом мониторинге – «LSTM»-модели для «PM» - «MAE₂ ≤ 1,63 мкг/м³, R² ≥ 0,80, гибридные архитектуры «ViT-UNet» для нефтяных разливов «F1 = 0,90», «ESN» для твердых частиц - улучшение составило до 67 %. Разработанная система контроля атмосферы с

применением технологий нейросети, включает сбор данных о метеопараметрах, концентрациях загрязняющих веществ: NO₂, SO₂, С₆H₆, нейронную сеть архитектуры «Sequential», сигмоидные активации, градиентный спуск, а также интеграцию «SCADA» «Trace Mode 7» с «СУБД» «MS SQL Server», которая позволяет получать оперативный прогноз с визуализацией на мнемосхеме. Применение нейронных сетей в экомониторинге представляет возможность получать больше информации об изменении состояния атмосферного воздуха с учетом погодных условий, географических особенностей.

Библиографический список

1. Володько О.С. Прогнозирование концентрации загрязняющих веществ // Семинар ИВМ СО РАН, Красноярск, 2025.
2. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Шагидуллина Р.А., Шмакова Ю.А. Повышение точности результатов расчетного мониторинга приземных концентраций примесей...// Вестник Казанского технологического университета. 2025. С. 180–182.
3. Кулакова Е.С. Разработка системы экологического мониторинга атмосферы с использованием возможностей нейронной сети. //Ж-л Электротехнические и информационные комплексы и системы, № 2. Т. 20. С. 115-122. 2024 г. <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-ekologicheskogo-monitoringa-atmosfery-s-ispolzovaniem-vozmozhnostey-neyronnoy-seti> (дата обращения: 02.05.2026)
4. Кольцов, В. Б. Процессы и аппараты защиты окружающей среды в 2 Ч. Часть 1 : Учебник и практикум / В. Б. Кольцов, О. В. Кольцова. – 1-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2017. – 277 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-04033-3. – EDN ZSYRZZ. (дата обращения: 02.05.2026)
5. Кольцова, О. В. Пространственно-временное проектирование сети постов мониторинга атмосферы города / О. В. Кольцова, Я. О. Теплова // Природообустройство. – 2011. – № 1. – С. 12-16. – EDN NUDBQV.