

Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур

О. А. Иващук¹, О. Р. Кузичкин¹, Д. В. Гончаров¹ , В. А. Дунаева¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru

Резюме

Цель исследования: формирование банка моделей для осуществления имитационных экспериментов по оценке и прогнозированию значений концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы территории на основе аппарата искусственных нейронных сетей и ГИС-технологий. Рассматривается влияние повышенной концентрации диоксида углерода в приземном слое атмосферы на рост и развитие сельскохозяйственных растений, а именно на изменение фотосинтетической активности, уровня минерализации гумусового слоя почвы, что влияет на урожайность культур. Особенности сельскохозяйственного производства определяют актуальность создания и внедрения новой интеллектуальной технологии, которая обеспечивает возможность выявления оптимальных параметров растениеводства.

Методы. Формирование обучающей выборки для нейронной сети осуществлялось за счет численных экспериментов и методов математического моделирования. Для выбора лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации парниковых газов на рассматриваемой территории были проведены эксперименты, которые позволили выявить среднеквадратическое отклонение и относительную погрешность. Для оценки прогностических способностей моделей были проведены натурные эксперименты по замерам концентраций CO₂ в приземном слое атмосферы на сельскохозяйственных территориях Белгородской области.

Результаты. Был разработан программный инструментарий, который позволяет визуализировать рассеивание и накопление парниковых газов в приземном слое атмосферы. Это позволяет проводить имитационные эксперименты, необходимые для определения территорий, которые находятся под воздействием техногенных источников. Была проведена оценка фотосинтетической активности растений на выбранной территории, что позволяет сформировать дальнейшие рекомендации по эффективному использованию сельскохозяйственной территории, направленные на повышение урожайности культур.

Заключение. Были рассмотрены парадигмы нейронных сетей, проведены эксперименты по выявлению лучшей топологии. Разработан программный инструментарий, позволяющий визуализировать рассеивание и накопление парниковых газов в приземном слое атмосферы для лиц, принимающих решения. Проанализированы воздействия техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений, на основании которых сформулированы выводы и практические рекомендации по выращиванию сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: адаптация сельскохозяйственных территорий; повышение урожайности; парниковый эффект; цифровые технологии; моделирование; искусственные нейронные сети.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-20016) «Разработка и исследование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта».

Для цитирования: Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур / О. А. Иващук, О. Р. Кузичкин, Д. В. Гончаров, В. А. Дунаева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 29-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-29-44>.

Поступила в редакцию 03.02.2023

Подписана в печать 27.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Современный уровень развития информационных технологий, методов математического, ситуационного и компьютерного моделирования, средств автоматизации позволяет решать широкий спектр проблемных междисциплинарных вопросов, в частности, в сфере управления экологической ситуацией на различных территориях. Эффективность реализуемых управляющих воздействий при этом определяется достоверностью данных экомониторинга и прогнозирования, адекватностью выявленных причинно-следственных связей.

В научной литературе отечественными и зарубежными учёными, в том числе на основе исследований авторского коллектива, показана высокая эффективность применения аппарата интеллектуального моделирования, в частности искусственных нейронных сетей и нечёткой логики, при решении

разных задач по обработке экологических данных и прогнозированию динамики природных сред (например, в работах [1-3]). Особенно результативно использование технологий искусственного интеллекта при решении задач комплексной оценки ситуации, определяющейся совокупным влиянием текущего и/или прогнозного состояния нескольких компонентов биотехносферы, а также необходимостью нахождения путей сбалансированного управления с учётом как сохранения природной среды и ресурсов, так и обеспечения высокого уровня развития техники и технологии [4].

В настоящее время у научной общественности значительно вырос интерес к решению комплекса вопросов, связанных с влиянием парникового эффекта (ПЭ) как на изменения в природной среде, так и на хозяйственную деятельность человека [5]. Для проведения необходимых оценок необходимы дан-

ные о концентрации в приземном слое атмосферы рассматриваемой территории парниковых газов, прежде всего CO₂. Данная информация может быть получена в результате инструментального мониторинга, однако это является трудозатратным, т.к. требует постоянное взятие проб воздуха (одновременно в нескольких точках), либо предполагает формирование центра по сбору данных, состоящего из множества специализированных газоанализаторов. Кроме того, для выработки научно обоснованного решения, необходима одновременная оценка параметров источников выбросов, а также прогноз динамики эмиссии. Таким образом, становится актуальной задача моделирования текущего и прогнозного распределения концентрации парниковых газов (ПГ) на рассматриваемых сельскохозяйственных территориях от источников техногенного воздействия в зависимости от различных параметров влияния внешней среды.

Различными учеными проводятся исследования по разработке методов и моделей для проведения оценок, и прогнозов изменения концентраций ПГ (углекислый газ, оксид азота, метан и т.д.) как от техногенных, так и от природных источников [6], а также для оценки и прогнозов изменений климата и соответствующих последствий [7]. При этом чаще всего рассматривается аспект ПЭ, негативно влияющий на экосистемы и здоровье людей.

Однако некоторые исследования указывают на положительное влияние,

оказываемое повышенной концентрацией CO₂ в приземном слое атмосферы на фотосинтетическую активность растений и последующее формирование урожайности [7, 8]. В среднем для всех видов сельскохозяйственных культур рост урожайности составляет около 26%, прирост сухого вещества молодых растений – около 40%.

Часть существующих методов может стать составляющей общего методологического инструментария для мониторинга, прогнозирования и управления в сфере выращивания сельскохозяйственных культур с достижением требуемых показателей урожайности с учётом динамики ПЭ. Однако необходим расширенный и одновременно детализированный спектр моделей и алгоритмов, позволяющих не только прогнозировать и оценивать уровень эмиссии, рассеивания и накопления ПГ, но и формировать адаптационные сценарии, определяющие наиболее результативные с точки зрения урожайности параметры посева сельскохозяйственных культур. Такие сценарии крайне важны для научного обоснования расположения территории и площади посевов, выбора специфики самой культуры, оценки ожидаемого эффекта.

Как указано выше, одним из перспективных методов прогнозирования и определения параметров территории является метод интеллектуального анализа данных. Вопросами развития современных методов и моделей в сфере экологического мониторинга и прогно-

зирования экологической ситуации посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых [9, 10]. Результатами исследований является – оценка содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и почве рассматриваемой территории, качество акустической среды и др., что является основой формирования информационной обеспеченности процесса управления территориальным зонированием на принципах экологической безопасности.

В данном исследовании авторами поставлена научная задача формирования банка адаптационных моделей для осуществления имитационных экспериментов по оценке и прогнозированию значений концентрации ПГ в приземном слое атмосферы территории с выявлением особенностей рассеивания и зон накопления на основе аппарата искусственных нейронных сетей и ГИС-технологий.

Материалы и методы

Для построения и апробации моделей исследовалась территория Белгородской области РФ, которая охватывает чуть более 27 тыс. км² площади, на

которой проживает более 1,5 млн. человек. Регион входит в пятёрку лидеров страны в аграрной отрасли.

По данным управления Росприроднадзора по Белгородской области по состоянию на конец 2022 года зарегистрировано около 430 предприятий, осуществляющих эмиссию выбросов в атмосферу, которая определяет динамику ПЭ. Ежегодно в регионе регистрируется около 200 тыс. тонн выбросов вредных веществ в атмосферу, из которых 70% приходится на промышленность, а остальные 30% на транспорт. Для определения направления распространения и накопления ПГ на территории Белгородской области была проанализирована «роза ветров» (рис. 1). Согласно данным за 2022 год, полученным от метеостанций Валуйки, Готня и метеостанции Научно-образовательного центра «Ботанический сад НИУ «БелГУ».

Анализ диаграмм указывает на равновероятное распределение направлений ветра по сторонам света: северное – 15%; северо-восточное – 15%; восточное – 14%; юго-восточное – 9%; южное – 10%, юго-западное – 12%; западное – 12%; северо-западное – 13%.

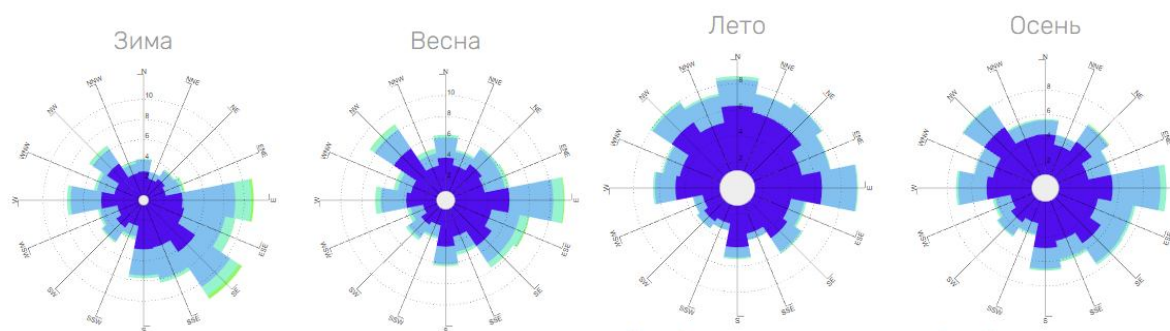


Рис. 1. Среднегодовая «Роза ветров» Белгородской области

В рамках исследования был проведен анализ источников и структуры выбросов ПГ в Белгородской области. Приземной слой атмосферы области загрязнен неравномерно, а максимальная концентрация ПГ находится в зоне источника выброса. По интенсивности выбросов можно выделить следующие 3 группы территориальных единиц:

- максимальный, преобладание выбросов промышленности (г. Губкин, г. Старый Оскол, г. Валуйки);
- умеренный, преобладание выбросов транспорта (г. Белгород);

– низкий, минимальные показатели выбросов (Вейделевский район, Красненский район, Ровеньской район).

Так, распределение источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на территории Белгородской области представлено на рис. 2.

Научные исследования указывают, что углекислый газ является основным антропогенным загрязнением, выбрасываемым в атмосферу в результате выполнения различных промышленных процессов [11, 12].

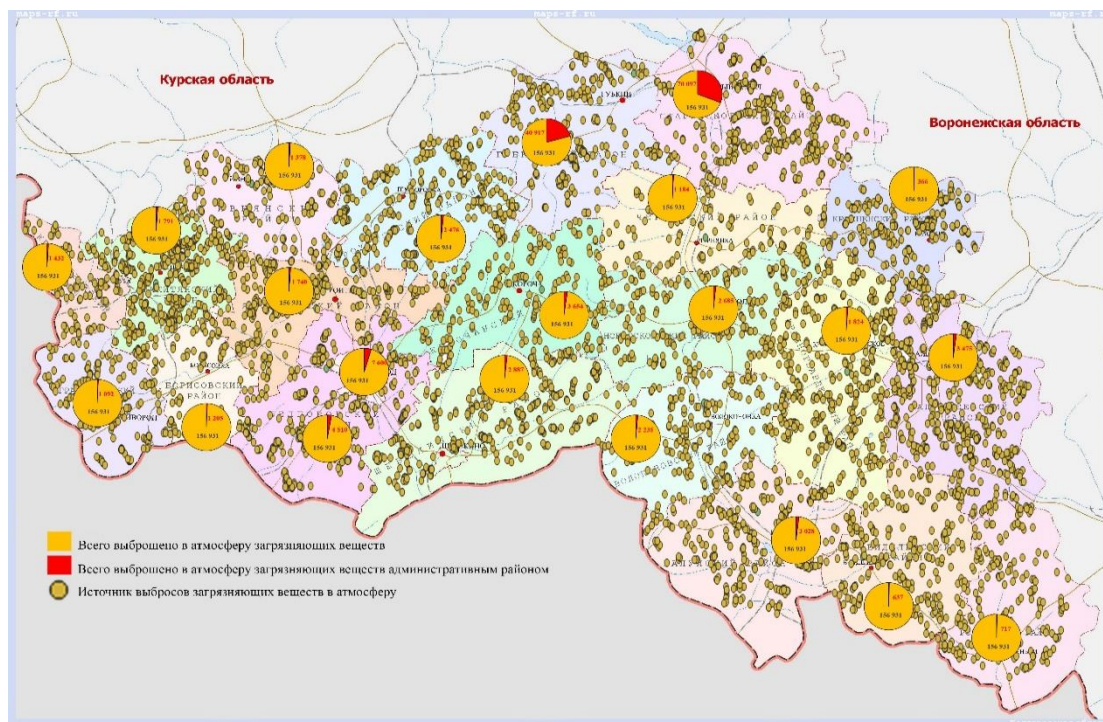


Рис. 2. Распределение источников выбросов на территории Белгородской области

Общая концентрация углекислого газа в атмосфере по сравнению с другими ПГ (CH_4 , O_3 , N_2O) является наибольшей. Ее ежегодное увеличение также обусловлено долгим временем жизни. На данный момент концентра-

ция углекислого газа в атмосфере в среднем составляет около 395 ppm. Однако у большинства растений наибольший прирост фитомассы достигается при концентрации CO_2 свыше 400 ppm.

Определение концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, в настоящее время, описывается «Методикой расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД-86» [13]. Однако при расчете концентрации загрязняющих веществ от двух и более источников, в случае неоднородности выбросов, данная расчетная методика обладает значительной степенью погрешности – около 30%. Так, использование искусственных нейронных сетей, которые способны к обобщению и позволяют учесть скрытые зависимости между выбросами от разных источников, а также адаптировать методику к топологическим, геологическим и атмосферным особенностям является целесообразным решением для преодоления данного недостатка [14, 15].

В качестве входных параметров модели были выбраны показатели, характеризующие источник выбросов загрязняющих веществ, $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$:

x_1 – объемный расход выбросов ($\text{м}^3/\text{ч}$);

x_2 – скорость газа ($\text{м}/\text{с}$);

x_3 – скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$);

x_4 – расстояние от точек выброса загрязняющих веществ до исследуемой сельскохозяйственной территории (м).

Выходными параметрами модели Y были определены концентрации основных ПГ в приземном слое атмосферы $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, $\text{мг}/\text{м}^3$: y_1 – углекислый газ (CO_2), y_2 – метан (CH_4), y_3 –

озон (O_3), y_4 – оксид азота (N_2O). Выбор данных загрязняющих веществ обусловлен тем, что именно они являются основными газами, оказывающими влияние на динамику ПЭ.

Для формирования обучающей выборки интеллектуальной системы определения концентрации CO_2 в приземном слое атмосферы рассматриваемой сельскохозяйственной территории, авторским коллективом проведены имитационные эксперименты с использованием методов расчета и рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосфере на основе подхода для расчета суммарного поля концентрации загрязняющих веществ от одиночных и множественных однообразных источников [16]. Проведено моделирование и визуализация с использованием геоинформационных систем качества атмосферного воздуха с привязкой к пространственным данным.

В соответствии с выбранной методикой, распределение рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы от одиночного источника выбросов загрязняющих веществ определяется для множества точек в пространстве по направлению оси выброса от источника, где распространение выбросов соответствует направлению ветра [13].

Для определения концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории (1) при условиях, отличных от u_{max} , используется расчет выброса от точечного источника, расположенного на расстоянии x_{max} (2).

$$c_{\max} = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt{\frac{\pi D^2}{4}} \omega_0 \Delta T}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, определяющий условие горизонтального и вертикального рассеивания и накопления ПГ в атмосфере, также зависящий от температурной стратификации атмосферы; M – масса выбрасываемых ПГ в атмосферу в единицу времени; F – безразмерный коэффициент, описывающий скорость оседания ПГ в атмосферном воздухе; m и n – безразмерный коэффициент, учитывающий условия выбросов; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; H – высота источника выброса; D – размер, характеризующий диаметр факела выбросов; ω_0 – средняя скорость выхода выбросов из источника; ΔT – разность температур выброса и атмосферного воздуха.

$$x_{\max} = \frac{(5-F)dH}{4}, \quad (2)$$

где d – безразмерный коэффициент, который зависит от характеристик источника выбросов. Концентрация ПГ c_y на оси факела точечного источника определяется как геометрическое место то-

чек в пространстве на различных расстояниях x от источника выброса вычисляется по формуле

$$c_y = \frac{s_1 c_{\max}}{(1+5t_y+12.8t_y^2+17t_y^3+45.1t_y^4)^2}, \quad (3)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент, определяемый отношением $x/x_{\max}$ и коэффициента F .

$$t_y = \frac{uy^2}{x^2} \quad (4)$$

при $u \leq 5 \text{ м/с}$,

$$t_y = \frac{5y^2}{x^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Расчет суммарной концентрации ПГ на рассматриваемой территории, если выбросы однородны, определяется как сумма концентраций выбрасываемого CO_2 от отдельных источников при заданных параметрах направления и скорости ветра.

$$c = c_1 + c_2 + \dots + c_N. \quad (6)$$

Таким образом для определения концентрации ПГ на рассматриваемой территории вычислялись поля концентраций ПГ от каждого источника с одинаковыми начальными условиями. Моделирование и визуализация выбросов показана на рис. 3.

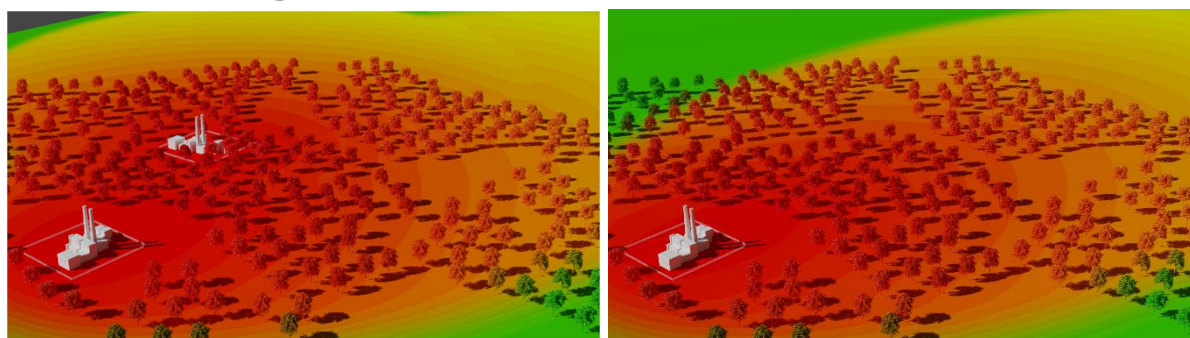


Рис. 3. Распространение ПГ при заданном ветре от одного и нескольких источников

Задача построения модели рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы сводится к решению задачи аппроксимации. Для решения задач такого класса эффективно исполь-

зуются нейронные сети с топологиями многослойного персептрона (рис. 4) и с радиально-базисной функцией активации (рис. 5).

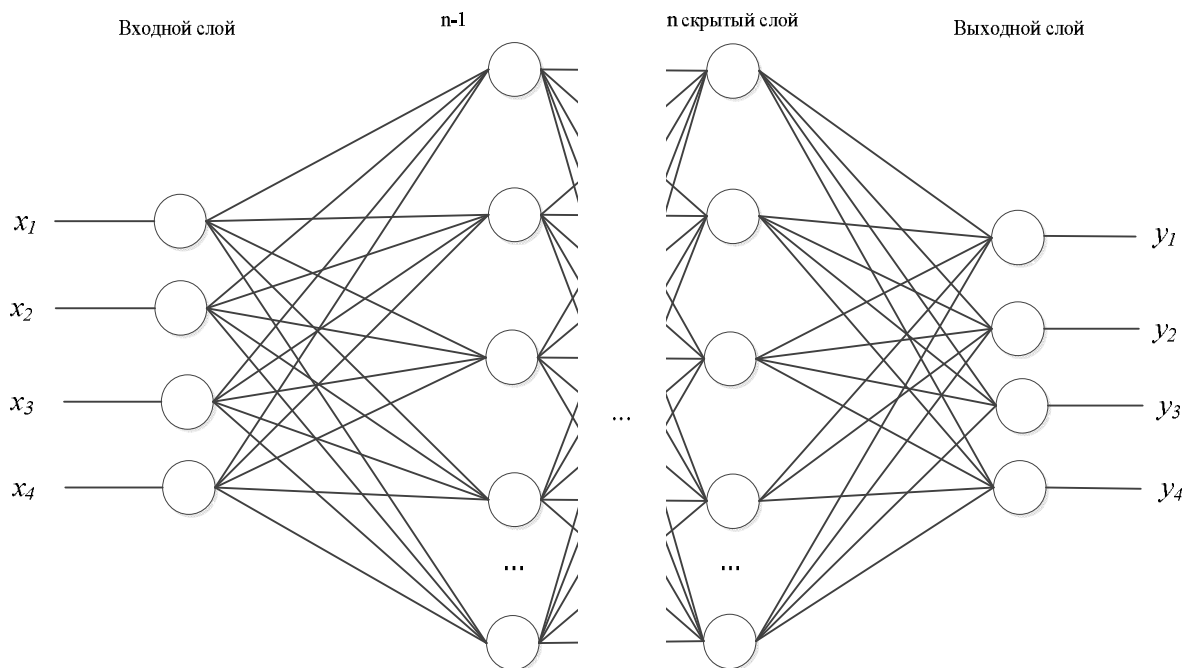


Рис. 4. Структура многослойного персептрона

Структура нейронной сети с топологией многослойного персептрона состоит из:

1. Входного слоя, на который поступает вектор входных значений $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ – слой, который принимает информацию о характеристиках выбросов стационарными источниками, находящимися на близлежащих территориях;
2. Скрытые слои взаимодействуют с внешней средой и характеризуют процессы рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы;

3. Выходной слой выдает вектор $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, содержащий концентрации ПГ в приземном слое атмосферы.

Структура нейронной сети с радиально-базисной функцией активации состоит из:

- Первый слой нейронов обрабатывает вектор входных значений $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ и определяет степень близости каждого значения к центрам радиально-базисных функций;
- Выходной слой – это линейные комбинации выходов первого слоя $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$.

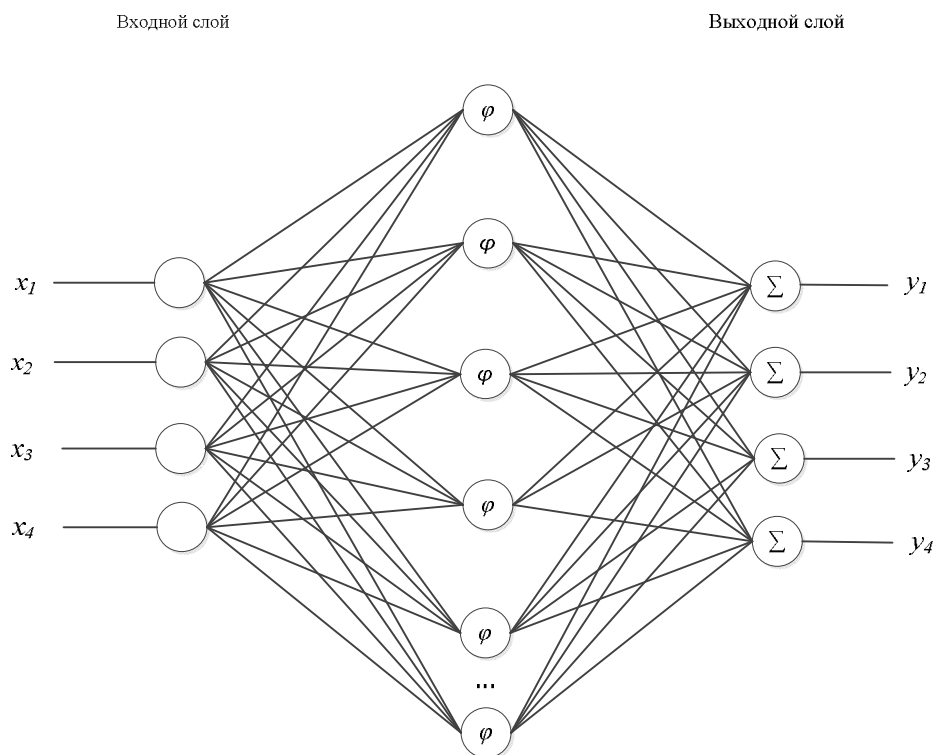


Рис. 5. Структура сети с радиально-базисной функцией активации

Для определения лучшей топологии нейронной сети были проведены эксперименты, в которых адекватность модели определялась по следующим показателям: среднеквадратичная ошибка S (7); коэффициент детерминации R^2 (8); средняя ошибка аппроксимации (9). В табл. 1 приведены результаты моделирования экспериментов для определения лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории ($S, R^2, \bar{A}$) [1, 2].

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{z}_i - z_i. \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{z}_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z}_i)^2}. \quad (8)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{z}_i - z_i}{\hat{z}_i} \right|. \quad (9)$$

Кроме того, для оценки прогностических способностей представленных моделей были проведены натурные эксперименты. С использованием газоанализатора ПКУ-4(-В-01, /1-МК-С-Н) проведены замеры концентраций CO_2 в приземном слое атмосферы на сельскохозяйственных территориях Белгородской области. Далее проводились имитационные эксперименты с использованием всех построенных и обученных ИНС с теми же входными данными и вычислением средней ошибки $\bar{A}_t$ (9), показаны в табл. 1.

Лучший результат показала нейронная сеть с топологией многослойного персептрона (2 скрытых слоя, 4 и 20

нейронов соответственно) и сигмоидными функциями активации. Структура модели показана на рис. 6.

Таблица 1. Результаты экспериментов для определения лучшей топологии нейронной сети по прогнозированию концентрации ПГ на рассматриваемой сельскохозяйственной территории

Топология сети	Количество нейронов в скрытом слое	Функция активация нейронов скрытого слоя	$S, 10^{-5}$	$R^2, \%$	$\bar{A}_l, \%$	$\bar{A}_t, \%$
RBF	143	Радиально - базисная	0,1	99,89	0,90	3,12
Персептрон	9	Линейная	0,18	99,72	0,92	2,36
Персептрон	11	Линейная	0,14	99,87	0,77	4,64
Персептрон	15	Линейная	0,15	99,82	0,82	4,12
Персептрон	17	Линейная	0,19	99,75	0,88	4,18
Персептрон	19	Линейная	0,2	99,58	0,92	3,48
Персептрон	8	Сигмоидная	0,16	99,88	0,93	2,35
Персептрон	12	Сигмоидная	0,12	99,86	0,94	2,44
Персептрон	13	Сигмоидная	0,14	99,88	0,97	2,39
Персептрон	20	Сигмоидная	0,17	99,85	0,98	2,32

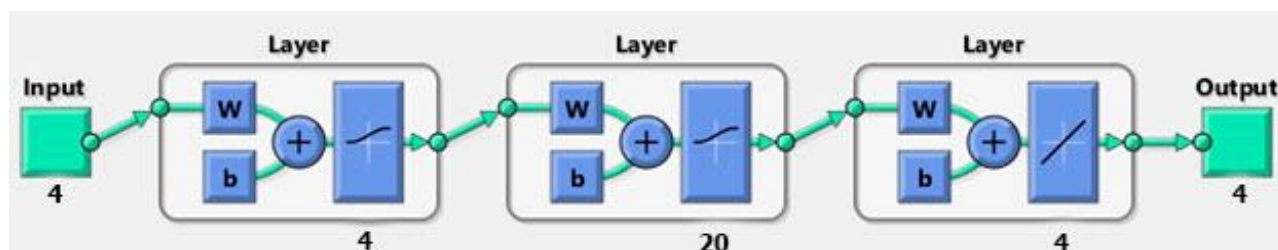


Рис. 6. Структура полученного многослойного персептрона, реализованная в системе MATLAB

Результаты и их обсуждение

Была разработана программная реализация с удобным пользовательским интерфейсом, которая позволяет проводить эксперименты специалистам предметной области, не обладающим специальными знаниями в сфере ИТ и моделирования, визуализировать техниче-

ские и природные ситуации для лиц, принимающих решения.

В связи с возросшей популярностью веб-приложений и необходимостью работы с растровыми и векторными геоданными для программной реализации, описанного выше алгоритма, был выбран язык программирования JavaScript. Библиотека Leaflet позволяет

пользователю осуществлять выбор сельскохозяйственной территории для проведения исследований и визуализировать результаты моделирования. Для более удобной и простой разработки веб-приложения в качестве фреймворка был выбран ReactJs, который также имеет модули для работы с картами. На рис. 7 приведен результат разработки веб-приложения.

Для проверки расчетов концентраций ПГ в приземном слое атмосферы веб-приложением было осуществлено 200 проб воздуха на сельскохозяй-

ственной территории. Проверочные эксперименты указывают на достоверность получаемых данных.

При определении источников выбросов также учитывались санитарно-защитные зоны, которые определяют возможность ведения сельскохозяйственной деятельности. Это позволяет исключить сельскохозяйственные территории, почва которых загрязнена такими веществами, как: медь, свинец, никель, хром, мышьяк, бензол, бензопирен и др.

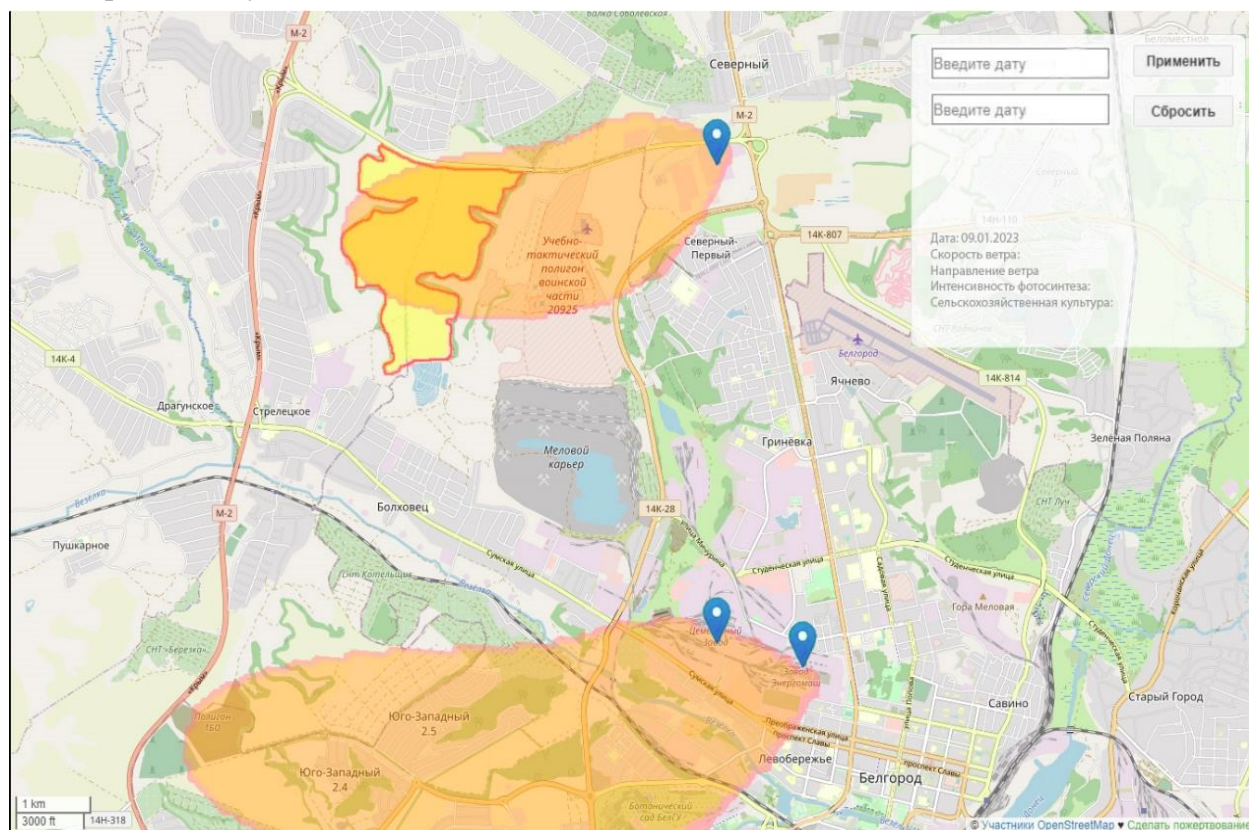


Рис. 7. Интерфейс веб-приложения

Проведённый имитационный эксперимент позволил определить территории, которые находятся под воздействием техногенных источников. Для

исследования была выбрана сельскохозяйственная территория, показанная на рис. 5. Пробы воздуха фиксируют увеличенную концентрацию CO_2 в призем-

ном слое атмосферы в дневной период, так, в период с 11:00 до 15:00 происходит увеличение концентрации углекислоты в атмосфере от 400 – 750 ppm.

Увеличенная концентрация CO_2 в приземном слое атмосферы может положительно сказаться на увеличении урожайности и приросте сухого вещества сельскохозяйственных растений [17, 18]. В связи с периодическим воз-

растанием концентрации ПГ для более детальной характеристики работы фотосинтетического аппарата растений в условиях динамики ПЭ, полученные данные были проанализированы с помощью модели Фаркьюхара [19], которая позволяет детально проанализировать воздействие техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений (табл. 2).

Таблица 2. Результаты воздействия техногенных факторов на фотосинтетический аппарат сельскохозяйственных растений

Параметры	Время измерения			
	11:00	13:00	15:00	17:00
Скорость темнового выделения CO_2	2,4 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	3,2 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	1,7 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Эффективность введения карбоксильной группы в органические соединения	0,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	1,9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	2 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}	0,5 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ Па^{-1}
Максимальная скорость введения карбоксильной группы в органические соединения	29 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	48 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	22 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	20 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Скорость электронного транспорта при световом насыщении	55 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	75 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	63 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	60 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Скорость утилизации триозы	3,3 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4,6 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	4 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	9 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$
Максимальная скорость поглощения CO_2	18 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	20 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	23 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	25 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$

Увеличение активности рибулозобисфосфаткарбоксилаза было зафиксировано в течение световой части дня, максимальное значение составляло около 37 мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (в 13:00), что на 30%

выше, чем при естественной концентрации углекислоты к концу измерений в 17:00. Приспособленность растений к изменяющимся условиям позволяет обес-

печить эффективное использование повышенной концентрации ПГ.

Практика передовых хозяйств показывает, что наивысшая продуктивность может быть достигнута при создании совокупности оптимальных условий роста и развития растений [20]. Таким образом, повышение урожайности сельскохозяйственных культур может быть связано с улучшением характеристик фотосинтетического аппарата листа и посева в тесной взаимосвязи с оптимизацией роста и распределения биомассы между органами растения с учетом онтогенетической динамики продукционного процесса.

Выводы

В результате проведенных исследований была построена нейросетевая мо-

дель, которая позволяет прогнозировать концентрацию ПГ в приземном слое атмосферы, рассматриваемой сельскохозяйственной территории. Были рассмотрены парадигмы искусственных нейронных сетей, проведены проверочные эксперименты, а которых лучший результат показала сеть с топологией многослойного персептрона.

Разработана программная реализация предложенной нейросетевой модели, которая позволяет проводить имитационные эксперименты по оценке фотосинтетической активности растений в условиях динамики ПЭ. Для конкретной сельскохозяйственной территории Белгородского региона сформированы практические рекомендации по выращиванию культур.

Список литературы

1. Федоров В. И., Иващук О. А., Ужаринский А. Ю. Разработка модели оценки и прогнозирования состояния почв сельско-городских территорий на основе искусственной нейронной сети // Научный результат. Информационные технологии. 2017. Т. 2. №. 4. С. 3-9.
2. Федоров В. И., Иващук О. Д., Долинский А. А. Разработка методов поддержки принятия решений при градостроительном зонировании сельско-городских территорий с использованием оценки качества почв // Успехи современного естествознания. 2019. №. 7. С. 127-132.
3. Штана А. И. Модель прогнозирования состояния почв сельско-городских территорий на основе нейронных сетей // Студенчество России: век XXI. Орел, 2019. С. 664-673.
4. Ivashchuk O.A., Fedorov V.I., Goncharov D.V. Approaches to the Development of an Automated Control System for the Adaptation of Agricultural Areas under the Changing

Greenhouse Effect // Mathematical Statistician and Engineering Applications. 2022. Vol. 71, №. 3s2. P. 948-956.

5. Албегов Р.Б., Гагиева С.С. Изменение климата Северного Кавказа. Возможные угрозы и ответные меры // Вестник МАНЭБ. 2010. Т. 15, № 4. С. 162-167.

6. Метешкин К. А., Кутицкая Е. С. Задача геомоделирования загрязнений урбанизированных территорий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2010. Т. 23. №. 2. С. 183-189.

7. Бисchoков Р. М., Суханова С. Ф. Основные факторы, оказывающие влияние на биологические объекты // Научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса в реализации Государственной программы развития сельского хозяйства до 2020 года. Курган, 2019. С. 413-418.

8. Прядкина Г.А. Пигменты, эффективность фотосинтеза и продуктивность пшеницы // Plant Varieties Studying and protection. 2018. Vol. 14, no 1.

9. Исследование загрязнения окружающей среды от выбросов вредных веществ промышленных предприятий с учетом климатических особенностей региона / К. В. Гармонов, Т. В. Щукина, М. Н. Жерлыкина, О. Б. Кукина // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. №. 3. С. 84-92.

10. Developing a framework to assess the long-term adoption of renewable energy technologies in the electric power sector / S. Radpour, E. Gemechu, M. Ahiduzzaman, A. Kumar // The effects of carbon price and economic incentives Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. № 111663. P. 152.

11. Коданева С. И. Потенциал цифровых технологий для смягчения последствий и адаптации к изменению климата // Россия и современный мир. 2022. №. 1 (114). С. 63-85.

12. Kenneth H., Brian V. M., Iva R. S. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 102. P. 1-13.

13. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ. 2021. №. 5. С. 21-27.

14. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.

15. Дрейзин В.Э., Гримов А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2-3. С. 223-228.

16. Вологжина С. Ж. Оценка загрязнения воздушного бассейна г. Улан-Удэ // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2011. Т. 1. С. 48-59.

17. Орлова И.В. Функциональное зонирование земель сельскохозяйственного назначения для целей сбалансированного природопользования // Фундаментальные исследования. 2014. №5.

18. Бисчоков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур для Кабардино-Балкарской Республики с использованием аппарата нечеткой логики // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2020. Т. 15. №. 2. С. 123-133.

19. Салимов Д. С., Эргашев А., Абдулоев А. Влияние повышенных концентраций CO₂ и других стрессовых экологических факторов на продуктивность и содержание крахмала белка в зерне различных сортов пшеницы // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2015. №. 1-5-2. С. 23-28.

20. Ивашук О. А., Федоров В. И., Гончаров Д. В. Разработка метода и алгоритма оценки сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция "ИТНО 2022"): Сборник научных трудов X Юбилейной международной научно-практической конференции, с. Дивноморское, 26 сентября – 02 2022 года / редкол.: Ю.Ф. Лачуга [и др.]. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2022. С. 232-236. DOI 10.23947/itse.2022.232-236. EDN RPYVRU.

Информация об авторах

Ивашук Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ivaschuk@bsu.edu.ru, SPIN-код: 143923, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-9141>

Кузичкин Олег Рудольфович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: kuzichkin@bsu.edu.ru, SPIN-код: 168062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-8896>

Гончаров Дмитрий Викторович, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru, SPIN-код: 1064632, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0499-0913>

Дунаева Виктория Александровна, студент кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: dunaeva@bsu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6065-9996>