

УДК 681:004.9:504.056

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ивашук О.А., Гончаров Д.В., Федоров В.И., Гурьянова О.И.

ФГАОУ ВО Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru

В данной статье представлены результаты разработки метода комплексного оценивания и прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных территорий в зависимости от техногенного и природного воздействия, в том числе рассеивания и накопления парниковых газов. Современная система мониторинга, прогнозирования и управления экологической ситуацией, использующая возможности искусственного интеллекта, может позволить обоснованно адаптировать сельскохозяйственные территории к изменениям климата с помощью их эффективного агроэкологического и природно-сельскохозяйственного зонирования. Обосновывается эффективность зонирования сельскохозяйственных территорий для обеспечения высокой урожайности растений. Представлен соответствующий программно-алгоритмический инструментарий, реализующий данный метод. Авторским коллективом рассмотрен новый подход к адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта и предложен новый способ агроэкологического и природно-сельскохозяйственного зонирования территорий для повышения урожайности культур. В статье представлена архитектура нечеткой системы, используется функционал программного продукта MATLAB и расширения Fuzzy Logic. В результате проведенной комплексной оценки был создан банк мероприятий по развитию и адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта. Практическое внедрение позволяет выбирать научно обоснованные мероприятия по зонированию сельскохозяйственных территорий, что даст возможность усилить эффективность конкретных управляющих воздействий по адаптации территорий в условиях динамики парникового эффекта, повысить уровень экологической и продовольственной безопасности.

Ключевые слова: комплексная оценка, адаптация сельскохозяйственных территорий, повышение урожайности, парниковый эффект, зонирование, алгоритм оценки

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».

COMPREHENSIVE ASSESSMENT METHOD OF AGRICULTURAL TERRITORIES BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY IN TERMS OF THE GREENHOUSE EFFECT DYNAMICS

Ivashchuk O.A., Goncharov D.V., Fedorov V.I., Guryanova O.I.

Belgorod State National Research University, Belgorod, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru

This article presents the results of the development of a method for the integrated assessment and forecasting of the productivity of agricultural territories depending on man-made and natural impacts, including the dispersion and accumulation of greenhouse gases. A modern system of monitoring, forecasting and management of the environmental situation, using the capabilities of artificial intelligence, can allow scientifically justified adaptation of agricultural territories to climate change through their effective agroecological and natural-agricultural zoning. The efficiency of zoning of agricultural territories to ensure high crop yields is substantiated. The corresponding software and algorithmic tools implementing this method are presented. The team of authors considered a new approach to the adaptation of agricultural territories in the conditions of the dynamics of the greenhouse effect and proposed a new method of agroecological and natural-agricultural zoning of territories to increase crop yields. The article presents the architecture of a fuzzy system, uses the functionality of the MATLAB software product and the Fuzzy Logic extension. As a result of the comprehensive assessment, a bank of measures for the development and adaptation of agricultural territories in the conditions of the dynamics of the greenhouse effect was created. Practical implementation makes it possible to choose scientifically based measures for the zoning of agricultural territories, which will increase the effectiveness of specific control actions for the adaptation of territories in the conditions of the dynamics of the greenhouse effect, increase the level of environmental and food security.

Keywords: integrated assessment, adaptation of agricultural areas, yield enhancement, greenhouse effect, zoning, assessment algorithm

Современный уровень развития информационных технологий, методов математического, ситуационного и компьютерного моделирования, средств автоматизации позволяет решать широкий спектр проблемных вопросов в сфере управления экологической ситуацией на различных территориях,

таких как: организация интеллектуального мониторинга; осуществление оценок и прогнозов; формирование, оценка и сравнение сценариев управления и др. [1, 2].

Следует отметить, что техногенные и природные объекты, а также процессы их взаимодействия характеризуются высокой

динамичностью и сложностью [3]. В научной литературе отечественными и зарубежными учеными, в том числе на основе исследований авторского коллектива, показана высокая эффективность применения аппарата интеллектуального моделирования, в частности искусственных нейронных сетей и нечеткой логики, при решении разных задач по обработке экологических данных и прогнозированию динамики природных сред [4]. Особенно результативно использование данных технологий искусственного интеллекта при решении задач комплексной оценки ситуации, определяющейся совокупным влиянием текущего и/или прогнозного состояния нескольких компонентов биотехносферы [5, 6].

Так, сегодня отсутствуют методы и модели для комплексной оценки возможной продуктивности сельскохозяйственных территорий на основе сложившегося и прогнозируемого пространственно-временного распределения концентрации парниковых газов (ПГ) (их рассеивания и накопления в приземном слое атмосферы). При этом важно проводить совокупный учет влияния как на состояние и характеристики самих сельскохозяйственных культур, так и влияния на возможности восстановления гумусового слоя почвы с учетом внешних воздействий, анализа используемых технологий и особенностей самой территории [7]. Разработка технологии подобной комплексной оценки позволяет расширить существующие методы интеллектуального анализа данных в сфере обеспечения экологической и продовольственной безопасности, создать новый результативный подход к обеспечению автоматизированного агроэкологического и природно-климатического зонирования территорий.

Авторским коллективом поставлена научная задача формирования метода и разработки соответствующего алгоритма для обеспечения актуализации следующих функций поддержки принятия решений – автоматизированная комплексная оценка возможной продуктивности исследуемой территории на основе анализа пространственно-временного распределения ПГ (рассеивания и накопления) в приземном слое атмосферы, а также автоматизированного формирования моделей адаптационных сценариев управления.

Материалы и методы исследования

На основе проведенного анализа научных источников и предыдущих результатов исследований авторского коллектива для решения поставленных задач, где требуется работа с большим количеством разнородных параметров, выбраны методы си-

туационного моделирования и управления, лингвистического подхода и аппарата нечеткой логики [8].

Ключевым показателем агроэкологической ситуации в данном случае является состояние рассматриваемой сельскохозяйственной территории с точки зрения ее продуктивности, определяющей урожайность сельскохозяйственных культур, находящейся в зоне влияния конкретных техногенных и природных объектов и/или процессов [9]. Исходя из теоретико-множественного подхода, представим соответствующую лингвистическую переменную в виде:

$$\{AtmGG, T, H, G, M\}, \quad (1)$$

где $AtmGG$ = «Агроэкологическая ситуация» – название лингвистической переменной; T – соответствующее базовое термножество (значения $AtmGG$); H – множество числовых характеристик для определения T ; G – синтаксические правила для образования новых значений $AtmGG$; M – семантические правила для образования G .

Исходя из вышесказанного, лингвистическая переменная $AtmGG$ будет являться составной:

$$AtmGG = (AtmGG_{\text{погл}}, AtmGG_{\text{урож}}), \quad (2)$$

где $AtmGG_{\text{погл}}$ – лингвистическая переменная, которая описывает состояние территории с точки зрения почвенной эмиссии; $AtmGG_{\text{урож}}$ – описывает состояние территории с точки зрения фотосинтетической активности сельскохозяйственных растений в условиях динамики парникового эффекта (ПЭ).

$$\{AtmGG_{\text{погл}}, T_{\text{погл}}, H_{\text{погл}}, G_{\text{погл}}, M_{\text{погл}}\}, \quad (3)$$

$$\{AtmGG_{\text{урож}}, T_{\text{урож}}, H_{\text{урож}}, G_{\text{урож}}, M_{\text{урож}}\}, \quad (4)$$

где $T_{\text{погл}}$ и $T_{\text{урож}}$ – термножества, определяющие значения лингвистических переменных $AtmGG_{\text{погл}}$ и $AtmGG_{\text{урож}}$. $T_{\text{погл}}$ и $T_{\text{урож}}$ – нечеткие переменные на числовом множестве $H_{\text{погл}}$ и $H_{\text{урож}}$.

Для оценки урожайности сельскохозяйственных культур исследуются рассеивание и накопление CO_2 в приземном слое атмосферы, концентрация которого в атмосфере по сравнению с другими ПГ (CH_4 , O_3 , N_2O) является наибольшей [10]. Это определило конкретизацию множества H .

Для осуществления комплексной оценки сельскохозяйственной территории с точки зрения минерализации гумусового слоя почвы введены следующие термины:

$$T_{\text{погл}} = \{T_{\text{погл}1}, T_{\text{погл}2}, T_{\text{погл}3}, T_{\text{погл}4}, T_{\text{погл}5}\}, \quad (5)$$

где $T_{\text{погл}1}$ = «наиболее эффективная», такая оценка эмиссии углекислого газа почвой

дается, когда скорость дыхания почвы составляет $35,47 \pm 0,05$ и $55,42 \pm 0,07$ моль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T_{\text{погл}2}$ = «эффективная», такая оценка эмиссии углекислого газа почвой дается, когда скорость дыхания почвы составляет $16,58 \pm 0,05$ и $35,47 \pm 0,07$ моль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T_{\text{погл}3}$ = «умеренная», такая оценка эмиссии углекислого газа почвой дается, когда скорость дыхания почвы составляет $6,76 \pm 0,08$ и $16,58 \pm 0,09$ моль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T_{\text{погл}4}$ = «низкая», такая оценка эмиссии углекислого газа почвой дается, когда скорость дыхания почвы составляет $0,58 \pm 0,08$ и $6,76 \pm 0,06$ моль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T_{\text{погл}5}$ = «неэффективная», такая оценка эмиссии углекислого газа почвой дается, когда скорость дыхания почвы составляет $0,26 \pm 0,04$ и $0,58 \pm 0,07$ моль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Для описания сельскохозяйственной территории с точки зрения фотосинтетической активности сельскохозяйственных растений в условиях динамики ПЭ введены следующие термы:

$$T_{\text{урож}} = \{ T_{\text{урож}1}, T_{\text{урож}2}, T_{\text{урож}3}, T_{\text{урож}4}, T_{\text{урож}5} \}, (6)$$

где $T_{\text{урож}1}$ = «наиболее эффективная», такая оценка концентрации ПГ в приземном слое атмосферы дается, когда концентрация CO_2 устанавливается в диапазоне 600–700 ppm.; $T_{\text{урож}2}$ = «эффективная», такая оценка концентрации ПГ в приземном слое атмосферы дается, когда концентрация CO_2 устанавливается в диапазоне 500–600 ppm.; $T_{\text{урож}3}$ = «умеренная», такая оценка концентраций ПГ в приземном слое атмосферы дается, когда концентрация CO_2 устанавливается в диапазоне 400–500 ppm.; $T_{\text{урож}4}$ = «низкая», такая оценка концентраций ПГ в приземном слое атмосферы дается, когда концентрация CO_2 устанавливается в диапазоне 300–400 ppm.; $T_{\text{урож}5}$ = «неэффективная», такая оценка концентрации ПГ в приземном слое атмосферы дается, когда концентрация CO_2 устанавливается ниже показателя в 300 ppm.

Для осуществления комплексной оценки сельскохозяйственной территории относительно ее продуктивности в условиях динамики ПЭ введем термы:

$$T = \{ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 \} (7)$$

где T_1 = «максимальная продуктивность», когда оценка с точки зрения влияния на уровень фотосинтеза растений $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «наиболее эффективная», и оценка с точки зрения эмиссии верхнего гумусового слоя $\text{AtmGG}_{\text{урож}}$ = «наиболее эффективная». При такой оценке сельскохозяйственная территория может использоваться для ведения органического земледелия с получением

высокой урожайности, которое исключает применение пестицидов, гербицидов, химических удобрений, различных регуляторов роста растений, а также генномодифицированного посевного материала выращивания растений. T_2 = «высокая продуктивность», когда оценка уровня фотосинтетической активности растений $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «эффективная», и оценка с точки зрения эмиссии верхнего гумусового слоя $\text{AtmGG}_{\text{урож}}$ = «эффективная», или когда одна из оценок принимает значение «эффективная», а другая оценка – «наиболее эффективная». При такой оценке сельскохозяйственная территория может быть эффективно использована для возделывания культурных растений с получением высокой урожайности. T_3 = «умеренная продуктивность», когда оценка с точки зрения влияния на уровень фотосинтеза растений $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «умеренная» или «эффективная», и оценка с точки зрения эмиссии верхнего гумусового слоя $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «умеренная» или «эффективная». При такой оценке сельскохозяйственная территория может быть использована для возделывания культурных растений с получением урожайности выше среднего уровня. T_4 = «низкая продуктивность», когда оценка с точки зрения влияния на уровень фотосинтеза растений $\text{AtmGG}_{\text{урож}}$ = «умеренная» или «низкая» и оценка с точки зрения эмиссии верхнего гумусового слоя $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «умеренная» или «низкая». При такой оценке сельскохозяйственная территория может быть использована для возделывания культурных растений, нечувствительных к увеличению концентрации CO_2 . T_5 = «минимальная продуктивность», когда оценка с точки зрения влияния на уровень фотосинтеза растений $\text{AtmGG}_{\text{урож}}$ = «неэффективная» или «низкая», и оценка с точки зрения эмиссии верхнего гумусового слоя $\text{AtmGG}_{\text{погл}}$ = «низкая» или «неэффективная». При такой оценке сельскохозяйственной территории рекомендуется высаживание однолетних растений для минерализации гумусового слоя почвы.

Результаты исследования и их обсуждение

Алгоритм формирования сценариев управления на основе описанного метода комплексной оценки сельскохозяйственных территорий представлен на рисунке 1. В начале данного алгоритма происходит сбор данных о концентрации ПГ в приземном слое атмосферы и уровне эмиссии почвы, данные могут быть получены в результате проведения полевых измерений или при моделировании прогнозного уровня.

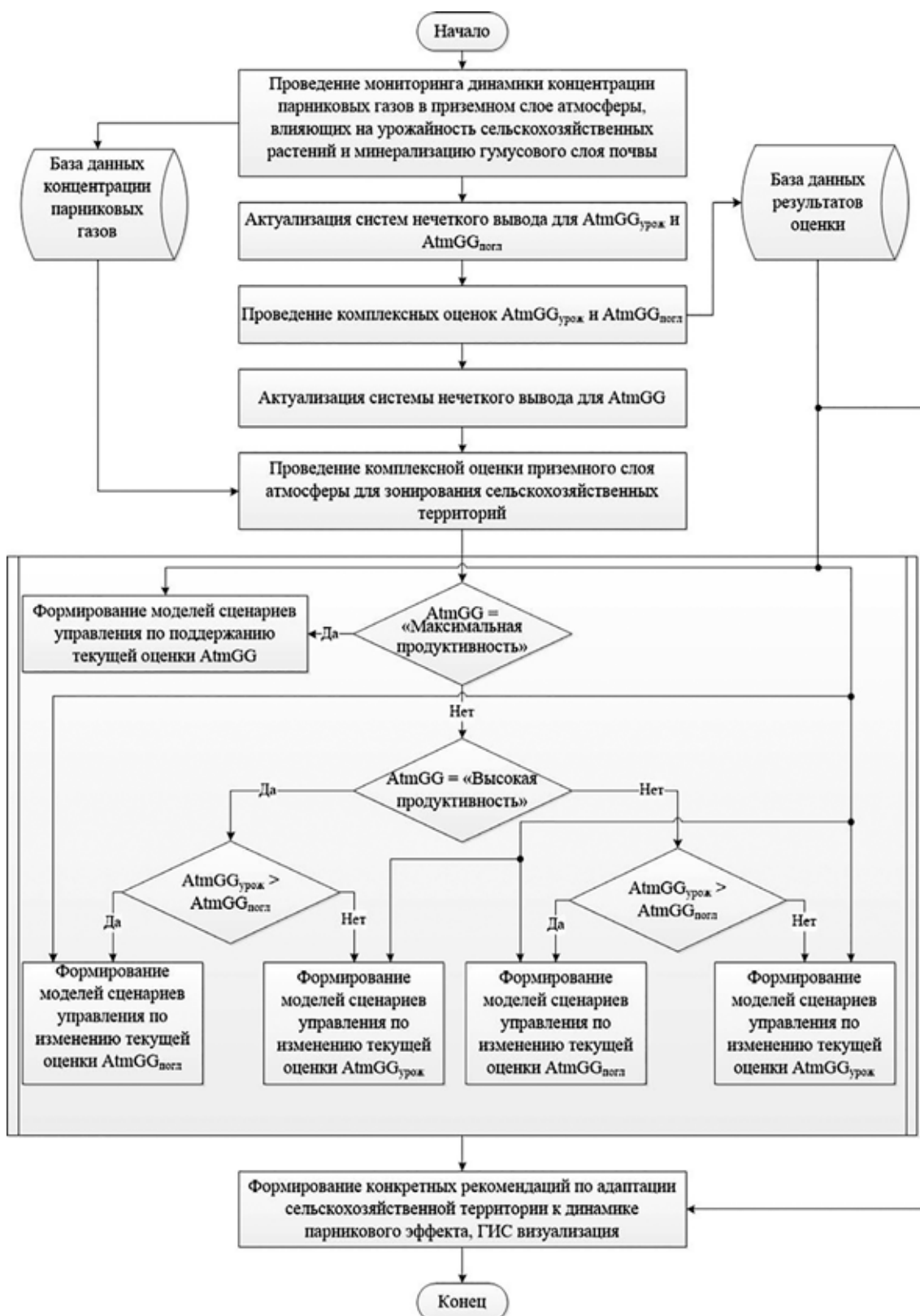


Рис. 1. Алгоритм формирования рекомендаций по адаптации сельскохозяйственных территорий на основе метода комплексной оценки

Следующим этапом является актуализация систем нечеткого вывода на основе полученных данных. Далее на основе значений лингвистических переменных $AtmGG_{\text{полл}}$ и $AtmGG_{\text{урож}}$ происходит вывод нечетких промежуточных оценок $AtmGG_{\text{полл}}$ и $AtmGG_{\text{урож}}$. Запись результатов оценки и показателей концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы в базу данных позволяет в дальнейшем вырабатывать научно обоснованные управленческие решения. На последующих этапах происходит получение итоговой комплексной оценки относительно исследуемой сельскохозяйственной территории. В случае получения комплексной оценки «максимальная продуктивность» происходит составление агротехнического плана по использованию и поддержанию параметров территории для ведения органического земледелия, в случае получения оценки «высокая продуктивность» происходит переход к этапу сравнения оценок $AtmGG_{\text{полл}}$ и $AtmGG_{\text{урож}}$, далее осуществляется детализация оценки, которая позволяет достичь большей точности при выборе сельскохозяйственной культуры и составлении агротехнического плана выращивания. На последнем этапе происходит формирование рекомендаций по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики ПЭ и визуализации результатов оценки с использованием ГИС-средств.

Описанный метод, основанный на ситуационном подходе, аппарате нечеткого моделирования и средств ГИС, может быть эффективно использован для проведения комплексной оценки текущего и прогнозного состояния сельскохозяйственных территорий с точки зрения перспективы высадки растений, а также для формирования научно обоснованных решений по зонированию территорий относительно динамики парникового эффекта в целях повышения урожайности.

Разработана программная реализация проведения комплексной оценки состояния сельскохозяйственной территории в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox с использованием m-функции anfis на основе настроенной системы нечеткого вывода. В процессе обучения параметры узлов сети настраиваются так, чтобы минимизировать стандартную ошибку (RMSE) – разность между измеренными показателями e^* и выходами сети e :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([e^* - e]^2)} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где N – количество наблюдений в выборке обучающих данных.

Для обучения Anfis сети и определения параметров функций принадлежности систем нечеткого вывода типа Сугено был использован алгоритм гибридного обучения, структура сети представлена на рисунке 2.

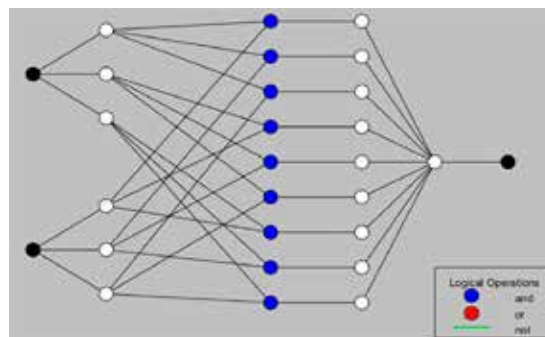


Рис. 2. Структурное представление нейро-нечеткой сети

Обучающая выборка содержит $n = 200$ наблюдений. Задано начальное значение шага 10^{-4} в направлении антиградиента критерия δ при изменении параметров функций принадлежности. Обучающее множество: средняя ошибка – $2 \cdot 10^{-1}$ максимальная ошибка – $4 \cdot 10^{-2}$, распознано – 95%. Тестовое множество: средняя ошибка – $2,7 \cdot 10^{-1}$, максимальная ошибка – $4,5 \cdot 10^{-2}$, распознано 92%. Зависимость выходной переменной от входных значений представлена в виде поверхности отклика, выполняющей функцию визуализации зависимостей (рис. 3).

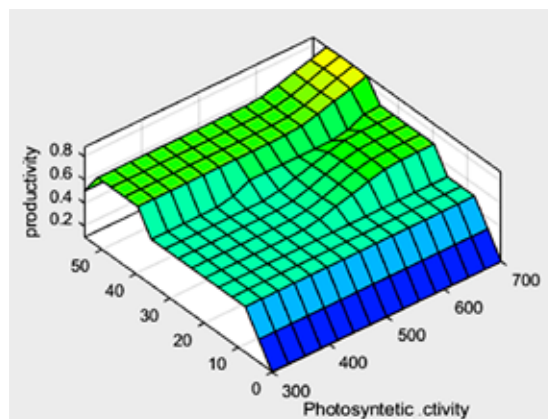


Рис. 3. Поверхность отклика

Для практического применения описанного алгоритма формирования сценариев управления по адаптации сельскохозяйственных территорий на основе метода комплексной оценки, а также выработки соответствующих рекомендаций был разработан программный комплекс с помощью языка программирования C# и среды разработки Visual Studio 2022.

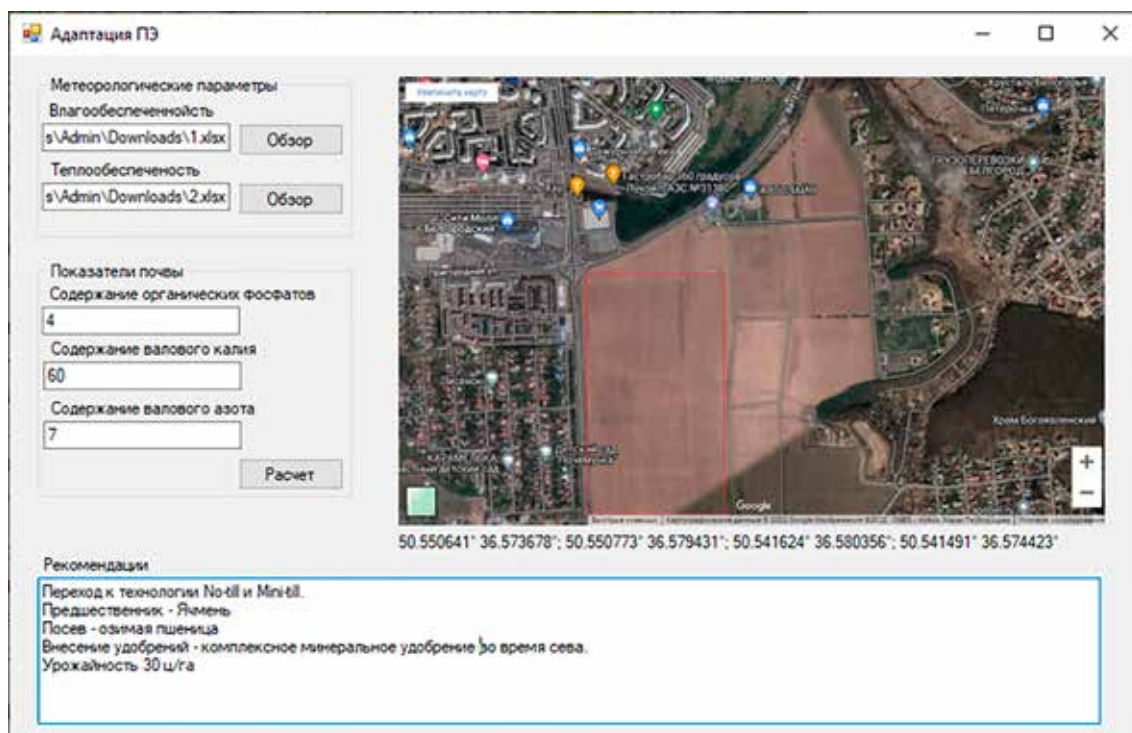


Рис. 4. Получение рекомендаций

Использование библиотек GMap.Net позволяет взаимодействовать с различными ГИС-системами, которые определяют возможность интерактивного выбора территории на карте для получения комплексной оценки и визуализации результатов прогнозирования.

Был разработан банк возможных мероприятий по увеличению урожайности сельскохозяйственных культур, таких как сроки посева и уборки, защита от сорняков и вредителей, севооборот, технологии обработки почвы и др. Тестирование предложенной автоматизированной системы проводилось на территории Белгородской области. Программное решение позволит формировать конкретные рекомендации по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики ПЭ.

Построение рекомендаций по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики ПЭ формируется на основе проведенной комплексной оценки и почвенных параметров – влагообеспеченность и теплообеспеченность почвы, а также уровень содержания органических фосфатов, валового калия и валового азота в верхнем плодородном слое почвы. Эти данные необходимы при выборе сельскохозяйственных культур для высадки на исследуемой территории, которые могут обеспечить высокую урожайность при текущей и прогнозной

концентрации CO_2 в приземном слое атмосферы, а также для определения технологии возделывания почвы. На рисунке 4 представлен результат формирования наиболее результативного сценария.

Заключение

В результате проведенных исследований были предложены метод комплексной оценки возможной продуктивности сельскохозяйственных территорий в условиях динамики ПЭ, его программная реализация. Полученные оценочные показатели легли в основу создания новой нейро-четкой технологии выбора мероприятий по научно обоснованному зонированию сельскохозяйственных территорий, что позволяет повысить эффективность конкретных управленческих решений по адаптации территорий в условиях динамики ПЭ в целях повышения урожайности, способствует обеспечению требуемого уровня экологической и продовольственной безопасности. Представлен конкретный результат использования разработанной автоматизированной системы.

Список литературы

1. Кахраманова Ш.Ш. Моделирование в градостроительстве и экологии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1. С. 28-40.

2. Васильев Д.Н. Информационно-имитационное моделирование экологических систем на основе бассейново-ландшафтного подхода: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.36. Москва, 2002. 20 с.
3. Малиновский А.В., Аканов Э.Н., Воронин П.Ю. Вегетационная климатическая установка для изучения воздействия на высшие растения увеличенной по сравнению с атмосферной концентрации CO₂ // Физиология растений. 2020. Т. 67. № 1. С. 105-112.
4. Лисецкий Ф.Н., Пичура В.И., Бреус Д.С. Оценка и прогноз изменений содержания гумуса в степных почвах с использованием геоинформационных и нейротехнологий // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 24-28.
5. Radpour S., Gemechu E., Ahiduzzaman Md., Kumar A. Developing a framework to assess the long-term adoption of renewable energy technologies in the electric power sector: the effects of carbon price and economic incentives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 111663. P. 152.
6. Hansen K., Mathiesen B.V., Skov I.R. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 102. P. 1-13.
7. Орлова И.В. Функциональное зонирование земель сельскохозяйственного назначения для целей сбалансированного природопользования // Фундаментальные исследования. 2014. № 5-4. С. 783-788.
8. 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.
9. Шайтура С.В., Сумзина Л.В., Томашевская Н.Г., Филимонов С.Л. Аграрный сектор в контексте глобального изменения климата // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 4. С. 18-24.
10. Фёдоров Б.Г. Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования. 2014. № 1 (142). С. 63-78.