

УДК 631.51:510.644  
DOI 10.17513/use.38327

## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ АГРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСПАШКИ ПОЧВЫ

<sup>1</sup>Косарев А.В., <sup>1</sup>Старцев А.С., <sup>1</sup>Колганов Д.А., <sup>1</sup>Чумакова С.В.,  
<sup>1</sup>Моршнева А.Ю., <sup>1</sup>Шибайкин В.А., <sup>2</sup>Симонова З.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, e-mail: aleteia@inbox.ru, ahilles974@mail.ru, dmi.kolg@mail.ru, ch-sv@yandex.ru, morshnev199@mail.ru, shibaikinva@vavilovsar.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, e-mail: simonovaza@yandex.ru

Цель работы – создание экспертной системы, которая на основе алгоритма нечеткой логики позволяет оценить эффективность вспашки почвы от ее агротехнических характеристик. Экспертная система оценки эффективности вспашки почвы разработана с использованием Fuzzy Logic Toolbox в MatLab. Пакет позволяет создавать системы нечеткого логического вывода, включая проектирование и моделирование. Результаты визуализируются через Rule Viewer и Surface Viewer, отображающие диалоговые окна и поверхности отклика. С помощью редактора Fuzzy Inference System Editor была создана экспертная система на основе алгоритма Мамдани для оценки эффективности вспашки почвы. Входные параметры: «грубая вспашка», «равномерность», «глубистость», «свальный гребень», «глубина» (оценка от 0 до 10). В отношении этих величин заданы функции принадлежности и три правила соответствия, определяющие значение эффективности вспашки почвы от входящих характеристик. Система тестировалась через Rule Viewer, показывая зависимость величины эффективности вспашки от входящих параметров. Поверхность отклика обнаруживает ступенчатую структуру и резко возрастает при увеличении глубистости выше 7 и свального гребня выше 5. Разработан пользовательский интерфейс, реализующий систему нечеткой логики для оценки экологического риска на основе экспертных оценок показателей качества окружающей среды. Система интегрируется в Simulink и может работать как независимое приложение. Интерфейс интуитивно понятен и позволяет вводить данные и получать результаты быстро. Алгоритмы нечеткой логики позволяют обрабатывать неточные данные, обеспечивая надежные прогнозы и рекомендации по агротехническим процессам. Интеграция с Simulink способствует комплексному подходу к управлению сельскохозяйственными процессами. Система легко расширяется за счет модулей и адаптируется к условиям и требованиям, улучшая оценку и прогнозирование в контексте мелиорации.

**Ключевые слова:** экспертная система, вспашка почвы, эффективность, агротехника

## THE EXPERT SYSTEM FOR EVALUATING THE AGROTECHNICAL EFFICIENCY OF SOIL PLOWING

<sup>1</sup>Kosarev A.V., <sup>1</sup>Startsev A.S., <sup>1</sup>Kolganov D.A., <sup>1</sup>Chumakova S.V.,  
<sup>1</sup>Morshnev A.Yu., <sup>1</sup>Shibaykin V.A., <sup>2</sup>Simonova Z.A.

<sup>1</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, e-mail: aleteia@inbox.ru, ahilles974@mail.ru, dmi.kolg@mail.ru, ch-sv@yandex.ru, morshnev199@mail.ru, shibaikinva@vavilovsar.ru;

<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: simonovaza@yandex.ru

The purpose of the work is to create an expert system that, based on a fuzzy logic algorithm, allows you to evaluate the effectiveness of plowing the soil from its agrotechnical characteristics. Materials and methods of research. The expert system for evaluating the effectiveness of tillage has been developed using the Fuzzy Logic Toolbox in MatLab. The package allows you to create fuzzy inference systems, including design and modeling. The results are visualized through the Rule Viewer and Surface Viewer, which display dialog boxes and response surfaces. The results and their discussion. Using the redactor Fuzzy Inference System Editor, an expert system based on the Mamdani algorithm was created to evaluate the effectiveness of plowing the soil. Input parameters: "Rough plowing", "Uniformity", "Clumpiness", "Pile ridge", "Depth" (score from 0 to 10). With respect to these values, membership functions and three compliance rules are set, which determine the value of the effectiveness of plowing the soil from the incoming characteristics. The system was tested through the "Rule Viewer", showing the dependence of the ploughing efficiency on the input parameters. The response surface shows a stepped structure and increases sharply with an increase in clumpiness above 7 and the pile ridge above 5. Conclusion. A user interface has been developed that implements a fuzzy logic system for assessing environmental risk based on expert assessments of environmental quality indicators. The system integrates into Simulink and can work as an independent application. The interface is intuitive and allows you to enter data and get results quickly. Fuzzy logic algorithms allow you to process inaccurate data, providing reliable forecasts and recommendations on agrotechnical processes. Integration with Simulink promotes an integrated approach to agricultural process management. The system is easily expanded through modules and adapts to conditions and requirements, improving assessment and forecasting in the context of land reclamation.

**Keywords:** expert system, tillage, efficiency, agricultural engineering

### Введение

Важная роль в условиях обеспечения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях засушливости принадлежит отвальным методам обработки почвы [1]. Так, увеличение глубины вспашки повышает влагоемкость корнеобитаемого слоя почвы при выращивании ячменя и повышает его урожайность за счет обогащения торфяного слоя грунтом [2]. Эффективная вспашка почвы приводит к увеличению площади листовой поверхности кукурузы и, как следствие, возрастанию ее фотосинтетической активности, приводящей к возрастанию урожайности [3]. Установлено, что пахотная обработка темно-серых лесных почв увеличивает урожайность зерновых культур севооборота [4]. Выбор метода обработки грунта оказывает значительное влияние на продуктивность и качество овса посевного в условиях Среднерусской лесостепи. Использование оборотного плуга с предплужниками предоставляет не только наивысшие урожайные показатели, но и способствует улучшению параметров, связанных с развитием и ростом данной культуры [5]. Применение вспашки при выращивании сои повышает ее урожайность на 7,7% по отношению к безотвальным методам обработки почвы [6]. Вспашка имеет значение в снижении корневой гнили в севооборотах с участием яровой пшеницы, так как помогает уничтожить оставшиеся растительные остатки, на которых могут развиваться патогены, а также изменяет микробиологический фон почвы [7]. Повышение урожайности подсолнечника в условиях черноземных почв юго-востока России создается благодаря отвальной обработке почвы в сочетании с внесением калийно-азотных удобрений [8]. Метод варьирования глубины вспашки позволяет создавать участки с различной плотностью почвы, что способствует созданию оптимальных условий для различных режимов увлажнения. Это, в свою очередь, помогает уменьшить колебания урожайности яровой пшеницы в течение нескольких лет на дерново-подзолистых почвах Ивановского региона [9].

В условиях повышения потребности в продовольствии и растущих агроэкологических вызовов ключевая роль в агротехнике и мелиорации принадлежит компьютерным экспертным системам [10]. Современные экспертные системы интегрируют в себе алгоритмические модели, которые позволяют анализировать метеорологические данные, состав почвы, уровень влаги

и другие параметры, важные для успешного агропочвоведения [11]. Комплексный подход, основанный на применении цифровых технологий и искусственного интеллекта, позволил разработать интегрированные подходы цифрового земледелия, направленные на повышение урожайности многих сельскохозяйственных культур [12]. Они предоставляют рекомендации по оптимальным срокам посева, эффективной ирригации и устранению засоренности посевов, что позволяет минимизировать расход ресурсов и максимально повысить урожайность [13]. Автоматизированные системы и разрабатываемые на их основе экспертные системы позволяют в режиме реального времени определять и сохранять оптимальные условия массообмена в почвенном слое и условия полива посевов [14].

**Цель исследования** – создать экспертную систему, которая на основе алгоритма нечеткой логики позволит при заданных характеристиках вспашки почвы оценить эффективность данного агротехнического мероприятия.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

а) определены входящие переменные модели (отклонение средней глубины вспашки от заданной, равномерность глубины вспашки, глыбистость, высота свального гребня, глубина вспашки под свальным гребнем) и исходящая переменная («эффективность вспашки почвы») и дана их количественная интерпретация;

б) заданы функции принадлежности входящих и исходящих величин, а также правила работы экспертной системы;

в) построен графический пользовательский интерфейс количественной оценки эффективности вспашки почвы на основе экспертных оценок.

### Материалы и методы исследования

Экспертная система оценки эффективности вспашки почвы построена с помощью пакета Fuzzy Logic Toolbox версия (2.2.24). Этот пакет программ входит в состав среды MatLab и предназначен для создания систем нечеткого логического вывода. Средство Fuzzy Logic Toolbox позволяет разрабатывать системы нечеткой логики на всех этапах, начиная с их проектирования и моделирования. Интуитивно понятная среда обеспечивается за счет встроенных графических модулей. Модуль Fussy Logic Designer предназначен для начала процесса фаззификации – задания входящих и ис-

ходящих переменных. Модуль Membership Function Editor предназначен для задания количества и вида функций принадлежности для каждой из входящих нечетких переменных. Модуль Rule Editor предназначен для завершения процесса фаззификации через задание правил, по которым множество входящих нечетких переменных отображается на множество исходящих переменных. Результат работы экспертной системы визуализируется с применением модуля Rule Viewer, предназначенного для выведения диалогового окна и модуля Surface Viewer, выводящего поверхности отклика, то есть зависимости исходящей переменной от входящих переменных.

### Результаты исследования и их обсуждение

Сначала определялись входные и выходные нечеткие переменные, после чего для каждой из них создавались функции принадлежности, а затем задавались правила работы системы.

Эти шаги были выполнены в MatLab с использованием инструмента Fuzzy Inference System Editor. Этот редактор дает возможность настраивать входные и выходные параметры, редактировать функции принадлежности, отслеживать выполнение правил и визуализировать реакцию системы. При исследовании связи эффективности вспашки почвы с характеристиками агротехнического процесса использовался алгоритм логического вывода Мамдани, работающий по принципу черного ящика, где на входе используются нечеткие и лингвистические переменные, а на выходе получают при-

ближенные количественные значения для каждой из введенных лингвистических переменных (рис. 1). Исходными параметрами выбраны переменные «грубая вспашка», определяющая отклонение средней грубой вспашки от заданной; «равномерность» глубины вспашки; «глыбистость», определяющая долю комков почвы с линейными размерами более 5 см; «свальный гребень» по его высоте, а также «глубина» вспашки над свальным гребнем. Оценивание данных агротехнических характеристик вспашки осуществлялось по шкале от 0 до 10, где 0 – минимальная оценка, а 10 – максимальная (рис. 2). Вид и количество функций принадлежности для входящих и исходящих переменных представлены в таблице. Правила экспертной системы определялись через меню «Edit rules». Число правил совпадало с числом значений исходящей переменной «эффективность вспашки почвы» и составляло 3. Система правил в экспертной системе задана следующим образом:

1) если «грубая вспашка» высокая, и «равномерность» низкая, и «глыбистость» высокая, и «свальный гребень» высокий, и «глубина» высокая, то «эффективность вспашки почвы» низкая;

2) если «грубая вспашка» низкая, и «равномерность» средняя, и «глыбистость» средняя, и «свальный гребень» низкий, и «глубина» высокая, то «эффективность вспашки почвы» средняя;

3) если «грубая вспашка» низкая, и «равномерность» высокая, и «глыбистость» низкая, и «свальный гребень» низкий, и «глубина» низкая, то «эффективность вспашки почвы» низкая.

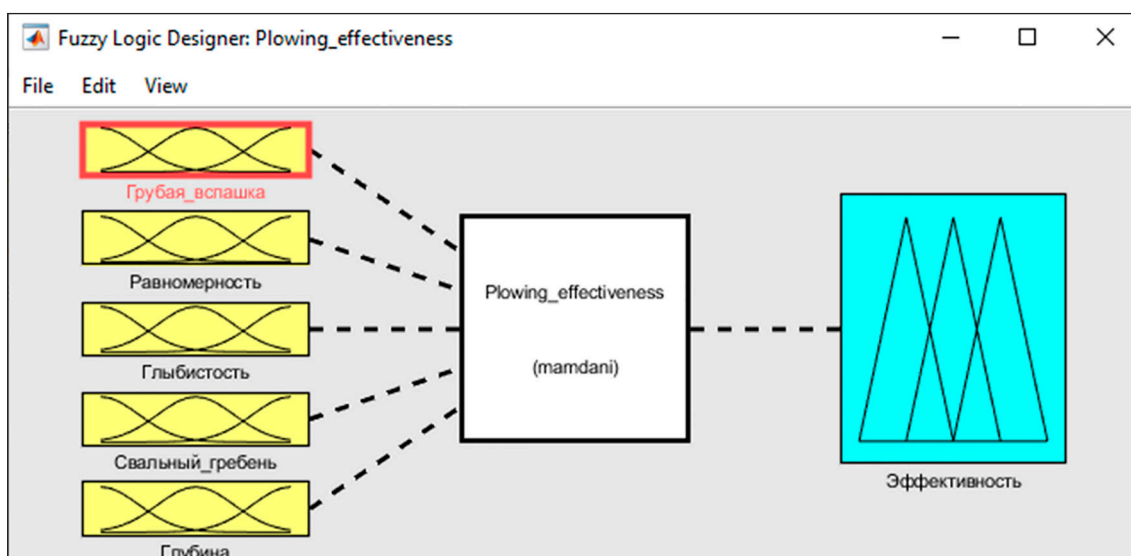


Рис. 1. Назначение входящих и исходящей переменных

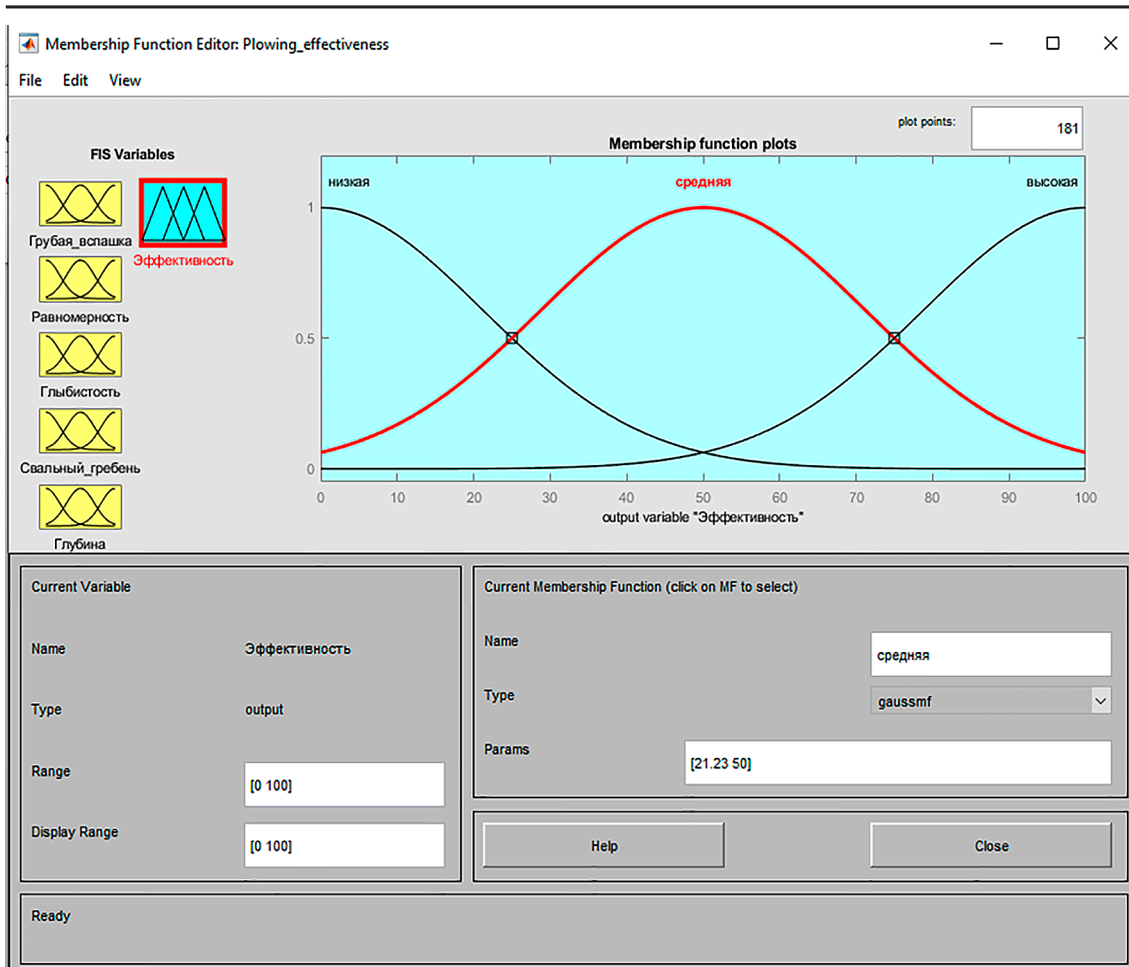


Рис. 2. Задание функций назначения для используемых нечетких переменных

Функции принадлежности входящих и исходящей переменных модели

Переменная	Количество функций принадлежности	Вид функций	Диапазон оценки	Классы функций принадлежности
Входящие				
«Грубая вспашка»	2	trapmf (трапецидальная)	[0; 10]	Низкая – высокая
«Равномерность»	3	Gauss2mf (модифицированная гауссовая)	[0; 10]	Низкая – средняя – высокая
«Глыбистость»	3	gaussmf (гауссовая)	[0; 10]	Высокая – средняя – низкая
«Свальный гребень»	2	trapmf (трапецидальная)	[0; 10]	Высокий – низкий
«Глубина»	3	gaussmf (гауссовая)	[0; 10]	Низкая – средняя – высокая
Исходящая				
«Эффективность вспашки почвы»	3	gaussmf (гауссовая)	[0; 10]	Низкая – средняя – высокая

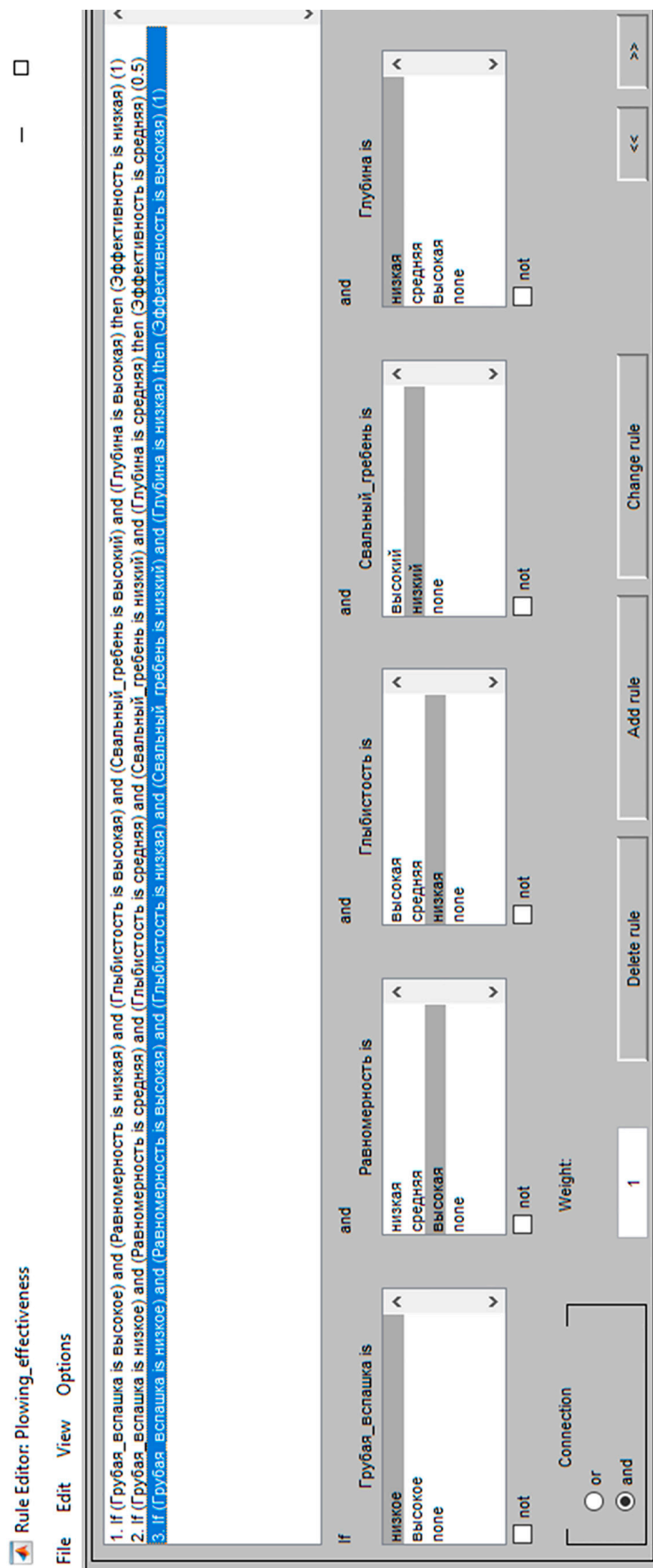
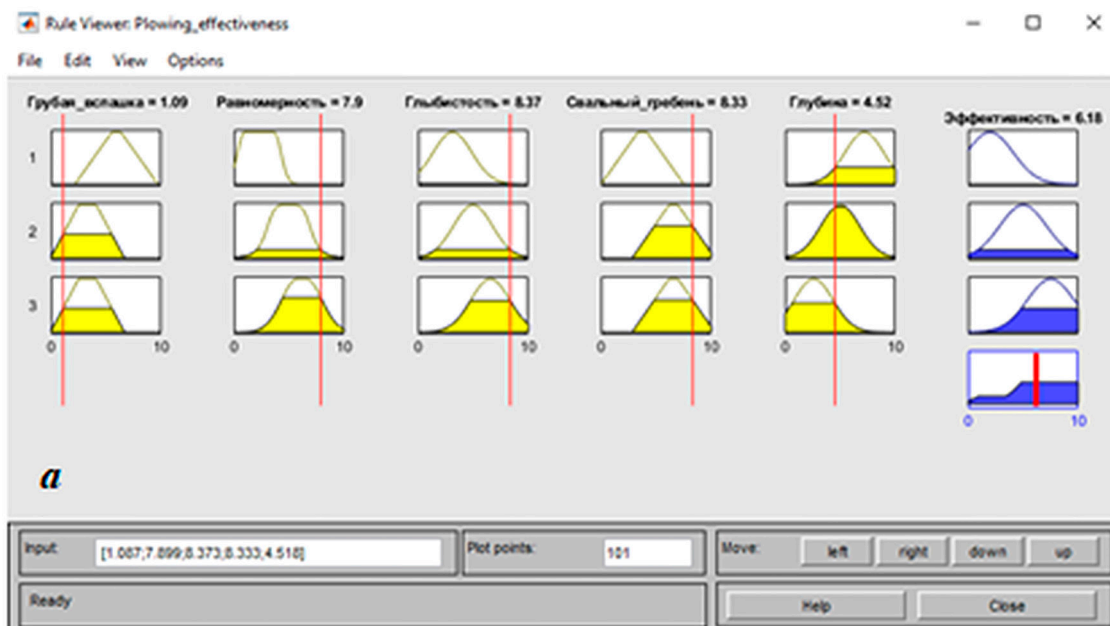
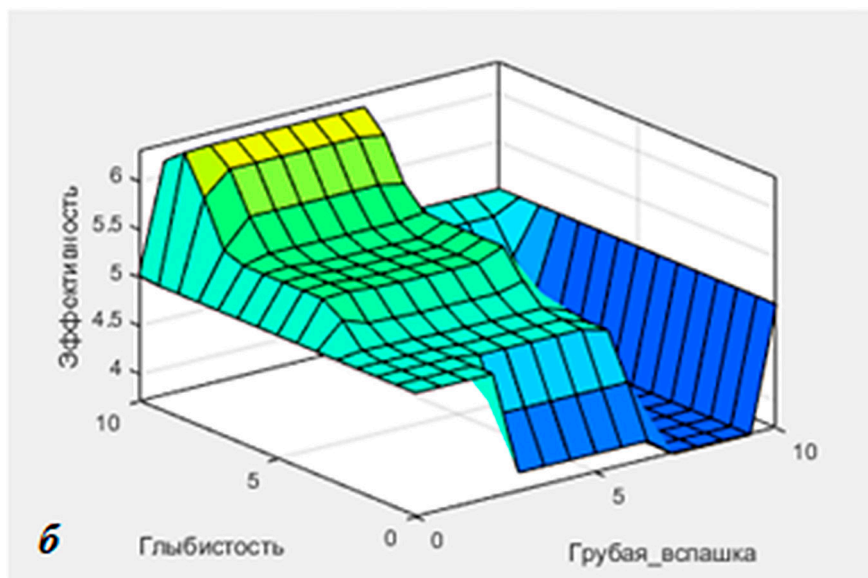


Рис. 3. Задание правил определения выходящей переменной (эффективности вспашки почвы) от входящих переменных (агротехнических характеристик вспашки)





**а**



**б**

Рис. 4. Результат работы экспертной системы: количественная оценка эффективности вспашки почвы (а); поверхность отклика между входящими переменными и исходящей переменной (б)

Эти правила отображались в окне редактора правил Rule Editor. При этом соединение условий происходит с помощью оператора *or*. Всем трем правилам присваивается вес, равный 1 (рис. 3).

Далее разработанная экспертная система была сохранена в файле под названием *Plowing\_effectiveness.fis* и тестировалась ее работа. Для этого экспертная система открывается через окно просмотра правил «Rule Viewer». В этом окне значения входящих параметров, располо-

женных в первых пяти столбцах, могут изменяться путем изменения положения движка в виде красной линии, а значение определяемого параметра – эффективности вспашки почвы перерасчитывается и выводится в четвертом столбце (рис. 4, а). Также экспертная система позволяет построить поверхность отклика – зависимость исходящего параметра (эффективности вспашки почвы) от входящих параметров (агротехнических характеристик вспашки) (рис. 4, б).

```

Plowing_effectiveness.fis x +
1 [System]
2 Name='Plowing_effectiveness'
3 Type='мандани'
4 Version=2.0
5 NumInputs=5
6 NumOutputs=1
7 NumRules=3
8 AndMethod='min'
9 OrMethod='max'
10 ImpMethod='min'
11 AggMethod='max'
12 DefuzzMethod='centroid'
13
14 [Input1]
15 Name='Грубая_вспашка'
16 Range=[0 10]
17 NumMFs=2
18 MF1='низкое':'trapmf',[-0.047121693121694 2.49487830687831 4.11887830687831 6.66087830687831]
19 MF2='высокое':'trapmf',[2.18538095238095 5.51938095238095 6.35238095238095 9.69238095238095]
20
21 [Input2]
22 Name='Равномерность'
23 Range=[0 10]
24 NumMFs=3
25 MF1='низкая':'gauss2mf',[0.629 0.959587301587301 0.629 3.6435873015873]
26 MF2='средняя':'gbellmf',[2.083 2.5 4.984]
27 MF3='высокая':'gauss2mf',[1.42 5.74702116402116 1.42 6.58402116402116]
28
29 [Input3]
30 Name='Глубистость'
31 Range=[0 10]
32 NumMFs=3
33 MF1='высокая':'gaussmf',[1.77 3.12169312169312]
34 MF2='средняя':'gaussmf',[1.77 4.984]
35 MF3='низкая':'gaussmf',[1.77 6.56084656084656]
36
37 [Input4]
38 Name='Свальный_гребень'
39 Range=[0 10]
40 NumMFs=2
41 MF1='высокий':'trapmf',[0.0170687830687823 3.34996878306878 4.18326878306878 7.51706878306878]
42 MF2='низкий':'trapmf',[2.83730158730159 6.17030158730159 7.00730158730159 10.3373015873016]
43
44 [Input5]
45 Name='Глубина'
46 Range=[0 10]
47 NumMFs=3
48 MF1='низкая':'gaussmf',[1.77 2.57806264550265]
49 MF2='средняя':'gaussmf',[1.769 5]
50 MF3='высокая':'gaussmf',[1.77 7.19067724867725]
51
52 [Output1]
53 Name='Эффективность'
54 Range=[0 10]
55 NumMFs=3
56 MF1='низкая':'gaussmf',[2.12 1.98412698412698]
57 MF2='средняя':'gaussmf',[2.123 5]
58 MF3='высокая':'gaussmf',[2.12 7.51322751322751]
59
60 [Rules]
61 2 1 1 1 3, 1 (1) : 1
62 1 2 2 2 2, 2 (1) : 1
63 1 3 3 2 1, 3 (1) : 1
64

```

Рис. 5. Листинг экспертной системы оценки качества вспашки почвы на языке Matlab

В рассмотренном нами варианте модели взаимосвязи входящих и исходящих переменных построенная поверхность отклика обнаруживает ступенчатую структуру и резко возрастает при увеличении глубистости выше 7 и свального гребня выше 5.

Листинг программы приведен на рис. 5. Таким образом, разработанная экспертная система оценки агротехнического качества почвы на базе Fuzzy Logic Toolbox легко интегрируется в среду Simulink. Это играет ключевую роль в автоматизации и повышении точности процессов, связанных с анализом и управлением агротехническими практиками: моделированием мелиоративных мероприятий, анализом и прогнозированием, визуализацией и настройкой. Используя Fuzzy Logic Toolbox, можно легко моделировать системы с неопределенностями, что особенно актуально для оценки почвы, где параметры могут варьироваться в широких пределах. Нечеткие системы позволяют учесть такие неопределенности и предоставить более гибкие и адаптируемые модели.

### Заключение

На базе инструментария Fuzzy Logic Toolbox был разработан пользовательский графический интерфейс, работающий на основе алгоритма нечеткой логики, позволяющий на основе экспертных оценок по ряду показателей качества окружающей среды реализовать экспертную систему, рассчитывающую величину экологического риска, а также анализирующую зависимость этой величины от входящих параметров – оценок качества окружающей среды. Данная система легко интегрируется в Simulink и содержит функции для независимо исполняемых приложений. Разработанный интерфейс обладает простым дизайном, позволяя пользователю без особых затруднений вводить необходимые данные и получать результаты расчетов в кратчайшие сроки. Таким образом, пользователь может получить надежные прогнозы и рекомендации по улучшению агротехнического процесса вспашки, основываясь на экспертных оценках и накопленных данных. Интеграция с Simulink позволяет использовать разработанную систему в рамках более крупных моделей, обеспечивая тем самым комплексный подход к управлению сельскохозяйственными процессами. Предусмотрена возможность расширения функционала интерфейса за счет добавления

модулей, что делает систему гибкой и адаптируемой к различным условиям и требованиям пользователя. Это позволяет не только улучшать алгоритмы оценки и прогнозирования, но и настраивать их под конкретные условия мелиорации.

### Список литературы

1. Скороходов В.Ю., Максютов Н.А., Зоров А.А., Митрофанов Д.В., Кафтан Ю.В., Зенкова Н.А. Влияние глубины и способа обработки почвы на ослабление засухи в Оренбургской области // Плодородие. 2022. № 2 (125). С. 29–33.
2. Моторин А.С. Влияние вспашки торфянисто-глеевой почвы на водно-тепловой режим и урожайность ячменя в условиях Северного Зауралья // Плодородие. 2023. № 4 (133). С. 50–53.
3. Смакуев А.Д., Власова О.И., Трубочева Л.В., Дорожко Г.Р. Приемы повышения урожайности кукурузы на зерно при возделывании в условиях зоны неустойчивого увлажнения // Вестник АПК Верхневолжья. 2021. № 2 (54). С. 5–10.
4. Дементьев Д.А., Фадеев А.А. Влияние способов обработки на целлюлозоразлагающую активность почвы и урожайность культур севооборотов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. Т. 24, № 3. С. 430–439.
5. Бобкова Ю.А., Сорокина М.В., Сидорова Е.К., Абакумов С.Н. Способ обработки почвы как фактор формирования урожая и качества овса посевного в условиях среднерусской лесостепи // Вестник аграрной науки. 2023. № 5 (104). С. 48–56.
6. Kravchenko R.V., Yablonskaya E.K., Kotlyarov V.V., Gish R.A., Dubovoy G.A. Influence of basic soil tillage methods and fertilizer rates on productive and economic indicators of soybean // Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2024. № 198. С. 147–157.
7. Разина А.А., Зайцев А.М., Солодун В.И., Дятлова О.Г. Корневая гниль яровой пшеницы в полевых севооборотах лесостепи Иркутской области // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53, № 7. С. 5–12.
8. Гармашов В.М., Говоров В.Н., Крячкова М.П. Эффективность приемов основной обработки почвы под подсолнечник в условиях юго-востока ЦЧР // Аграрная Россия. 2023. № 4. С. 3–8.
9. Гарифуллин И.И. Влияние обработок почвы при различных погодных условиях на урожайность яровой пшеницы // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2024. № 2 (77). С. 28–32.
10. Смыслов Д.М., Греченева А.В., Котов Я.С., Голбан А.Н., Макеев К.А. Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений для задач растениеводства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 227–230.
11. Козырева Л.В., Доброхотов А.В. Рациональное использование водных ресурсов с автоматизированным расчетом полива посевов на орошаемом поле // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 92–107.
12. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммоев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «умное поле» // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1. С. 81–91.
13. Каличкин В.К., Альсова О.К., Максимович К.Ю., Васильева Н.В. Прогнозирование засоренности посевов с использованием методов машинного обучения // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 67–72.
14. Черных А.Г. Исследование закрытой оросительной системы с двумя напорными источниками с помощью методов математического моделирования // Актуальные вопросы аграрной науки. 2022. № 42. С. 30–39.