

DOI 10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157  
УДК 551. 501 (470.64)*Научная статья / Research article*

## Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей

**Р.М. Бисчоков** 

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет  
им. В.М. Кокова, г. Нальчик, Российская Федерация  
✉ [rusbis@mail.ru](mailto:rusbis@mail.ru)

**Аннотация.** Сделана попытка выбора конфигураций, обучения и тестирования искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования урожайности зерновых культур с учетом динамики изменения климатических характеристик. Особенности аграрного производства требуют постоянного совершенствования методов анализа урожайности сельскохозяйственных культур и временных рядов, многолетних природно-климатических характеристик. Предварительное статистическое оценивание рассмотренных временных рядов позволило выявить определенные закономерности. Временные ряды разбиваются на четыре интервала: для построения сети, ее обучения, тестирования и контроля. В ходе построения ИНС воспользовались тремя моделями: MLP—многослойный перцептрон, RBF—радиальные базисные функции и GRNN—обобщенно-регрессионная нейронная сеть. По результатам построения выбрана наилучшая модель. На входе ИНС использовалась сумма активных температур воздуха и сумма осадков за период вегетации, а на выходе—урожайность сельскохозяйственной культуры. Применение совокупностей нейронных систем, автоматизировано генерируемых, способствовало эффективному прогнозированию урожайности зерновых культур на основе анализа климатических данных. В итоге по отобранной модели ИНС проводился прогноз урожайности на предстоящие годы с учетом природно-климатических характеристик.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, анализ природно-климатических характеристик, прогноз урожайности, статистическое оценивание, искусственные нейронные сети, обучение сети

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**История статьи:** поступила в редакцию 24 ноября 2020 г., принята к публикации 5 марта 2022 г.

---

© Бисчоков Р.М., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

**Для цитирования:** Бисчоков Р.М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2022. Т. 17. № 2. С. 146—157. doi: 10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157

## Analysis, modelling and forecasting of crop yields using artificial neural networks

Ruslan M. Bischokov 

Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation

✉ rusbis@mail.ru

**Abstract.** The article gives information about the attempt made to select configurations, train and test artificial neural networks for predicting yields of grain crops considering of climate changes. Peculiarities of agricultural production require constant improvement of methods for analyzing crop yields, time series, and long-term climatic characteristics. Preliminary statistical evaluation of the considered time series made it possible to identify certain patterns. Time series were divided into four intervals: for building a network, its training, testing and control. During the construction of artificial neural networks, three models were used: MLP—multilayer perceptron, RBF—radial basis functions and GRNN—generalized regression neural network. Based on the results of the construction, the best model was chosen. The sum of active air temperatures and the sum of precipitation for the growing season was used for artificial neural networks at the input, and the crop yield was used at the output. The use of sets of neural systems, generated automatically, contributed to the effective forecasting of crop yields based on the analysis of climate data. As a result, according to the selected model, a yield forecast was made for the coming years considering climatic characteristics.

**Keywords:** mathematical modeling, analysis of climate characteristics, yield forecast, statistical estimation, artificial neural networks, network training

**Conflicts of interest.** The authors declared no conflicts of interest.

**Article history:** Received: 24 November 2020. Accepted: 5 March 2022

**For citation:** Bischokov RM. Analysis, modelling and forecasting of crop yields using artificial neural networks. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022;17(2):146—157. doi: 10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157

### Введение

Использование инструментария искусственных нейронных сетей (ИНС) в методах моделирования прогнозирования и управления аграрной сферы обусловлено результативностью, адаптируемостью и эффективностью [1, 2].

Для планирования и принятия инвестиционных решений в аграрном производстве важной предпосылкой является моделирование процессов с целью на-

дежного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с учетом природно-климатических факторов [3, 4].

В обеспечении продовольственной безопасности страны особую роль играет урожайность зерновых культур, поэтому изучение их особенностей всегда актуально.

В период вегетации на культуру оказывает влияние множество факторов: качество и сорт семян, почвенные характеристики, климатические условия, количество внесенных удобрений и другие агротехнические мероприятия. Одни из этих факторов оказывают больше влияния, а другие меньше при формировании урожая. Риски снижения урожайности сельскохозяйственных культур обуславливаются неблагоприятными почвенно-климатическими и погодными условиями [3, 4].

Проведение агротехнических мероприятий с учетом климатических условий — один из основных факторов получения хорошего урожая.

Во многих исследованиях урожайности сельскохозяйственных культур основным фактором принимается гидротермический коэффициент (ГТК), который является интегральным индикатором возделывания растений. Выявлено, что к неблагоприятным по погодным условиям для возделывания озимой пшеницы относятся годы с  $ГТК < 1$ , к благоприятным — при значениях от 1 до 1,4, к особо благоприятным — при  $ГТК > 1,4$  [5—8].

Многие отечественные и зарубежные ученые (Е. Бочаров, А. Ильченко, Л. Кальянов, А. Гагарин, И. Егорова, О. Солдатова, С. Хайкин, Я. Потмешил, Х. Уайт и др.) считают, что математическое моделирование на основе ИНС позволяет решать частично-структурированные задачи, например прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур с учетом динамики изменения климатических характеристик [9—12].

В предшествующих публикациях проведены статистические оценивания временных климатических рядов и урожайности сельскохозяйственных культур. Применение совокупностей нейронных систем для прогнозирования урожайности зерновых культур на основе анализа климатических данных является новшеством [13—15].

**Цель исследования** — выбор конфигураций, обучение и тестирование ИНС для прогнозирования урожайности зерновых культур с учетом динамики изменения климатических характеристик на территории Кабардино-Балкарской Республики. Прогнозирование урожайности обеспечивает принятие правильных решений при планировании посевных площадей и культур на следующий сельскохозяйственный год. К примеру, для снижения риска потери урожая сельскохозяйственных культур из-за аномальных погодных процессов (град, наводнения, ливневые дожди и т. д.) можно использовать культуры с коротким сроком вегетации, чтобы осуществить уборку до катаклизма или посев после него [13—15].

## Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследований использованы климатические характеристики (сумма активной температуры воздуха и количества осадков на период вегетации) и урожайности зерновых культур за 49 лет. Для построения, обучения,

тестирования и контроля ИНС использована программа STATISTICA, модуль NEURAL NETWORKS.

В качестве входных данных использовали климатические характеристики: сумму активных температур воздуха и суммарное количество осадков за вегетационный период, на выходе получали данные по урожайности сельскохозяйственных культур [13—15]. Для каждой сельскохозяйственной культуры активная температура различная. Приведем в табл. 1 диапазоны возможных минимальных температур воздуха для различных культур в период вегетации.

Таблица 1

### Минимальная температура воздуха фаз развития культур

Культура	Периоды вегетации			
	Прорастание семян	Появление всходов	Вегетационный рост	Репродукция
Рис	12...15	14...15	15	—
Просо	8...10	—	10...12	16...19
Кукуруза	9...10	10...12	—	16
Лен	3...4	6	8	15...17
Озимая пшеница	1...4	4...6	5	5
Ячмень	1...2	8...10	5	—
Овес	1...2	4...5	5	—

Table 1

### Minimum air temperature for crop development

Crop	Growth stages			
	Germination	Seedling emergence	Vegetative growth	Reproductive growth
Rice	12...15	14...15	15	—
Millet	8...10	—	10...12	16...19
Corn	9...10	10...12	—	16
Flax	3...4	6	8	15...17
Winter wheat	1...4	4...6	5	5
Barley	1...2	8...10	5	—
Oat	1...2	4...5	5	—

Строились искусственные нейронные сети по исходным данным первых 31 лет. В программе доступны 5 моделей построения ИНС: Linear (линейная), PNN or GRNN (обобщенно-регрессионная нейронная), Radial basis function (RBF — радиальные базисные функции), Three layer perceptron (трехслойный перцептрон) и Four layer perceptron (четырёхслойный перцептрон), MLP (многослойный перцептрон). Можно

выбрать одну из них или несколько. Программа привела в качестве результатов расчета в табличной форме 35 комбинаций ИНС по всем трем моделям, описывающих аналог фактических данных первых 21 лет. Следующим шагом по данным 10 лет проводилось обучение построенных нейронных сетей.

Для дальнейшей отладки (тестирование и контроль) программа отобрала 5 наиболее оптимальных сетей. Затем по данным следующих 9 лет проводилось тестирование и по данным последних 9 лет осуществлялся контроль выбранных сетей. Результатом процессов был выбор одной нейронной сети, по которой проводится прогнозирование урожайности на предстоящие годы. Эту сеть можно сохранить и для дальнейших использований.

Отбор 5 оптимальных сетей и результатной сети можно проводить вручную путем сравнения исходных и расчетных данных урожайности зерновых культур [13—15].

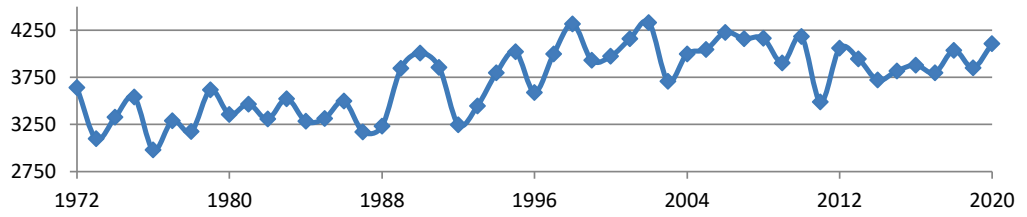
## Результаты исследования и обсуждение

Исследование проведено по следующей схеме: 1. Выбраны объекты исследования — показатели урожайности озимой пшеницы и кукурузы за 49 лет. 2. Рассчитаны значения климатических факторов: количество осадков и сумма активной температуры воздуха за вегетационный период культуры на 1972—2020 гг. 3. Построили 35 конфигураций ИНС по трем типам; задали количество сетей и число сохраняемых сетей; выбрали тип сети или конфигурацию; задали формат представления итоговых результатов. 4. Запустили процедуру обучения нейронных сетей. 5. Проанализировали полученные решения. Выбрали определенную сеть путем сравнения наблюдаемых значений и расчетных результатов. 6. Сохранили лучшие сети для прогнозирования урожайности зерновых культур с учетом динамики изменения климатических факторов на предстоящие годы.

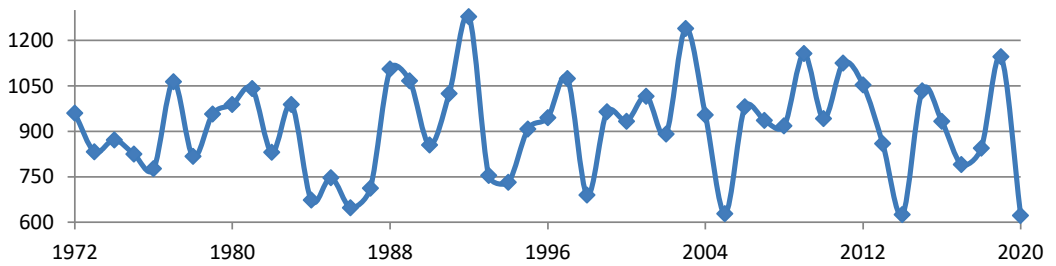
Динамика изменения суммы активной температуры, количества осадков за периоды вегетации и урожайности зерновых культур приведены на рис. 1 и 2.

Для озимой пшеницы в зимний период за активную температуру воздуха приняли 1 °С, в остальные периоды — 5 °С, вегетационный период составил 275...340 дней. Для кукурузы вегетационный период определен с 22 марта по 22 сентября, а за активные температуры взяли значения не менее 10 °С [15].

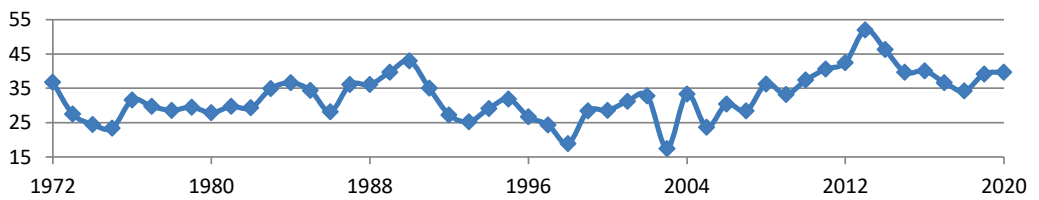
Загрузили исходные данные в программу, задали параметры настройки для построения искусственных нейронных сетей: временные ряды, входные переменные (активные температуры воздуха и количество осадков) и выходные (урожайности выбранной культуры), длительность анализа (число испытываемых сетей или время решений), тип сетей (линейная, вероятностная, на радиальных базисных функциях, многослойный персептрон). Выбрали комбинацию сетей GRNN, RBF и MLP. Для построения сетей использовали исходные данные первых 21 лет, по которым построены 35 комбинаций сетей. Результатом обучения построенных сетей по данным следующих 10 лет явился отбор 5 наиболее оптимальных сетей (табл. 2) [13—15].



a



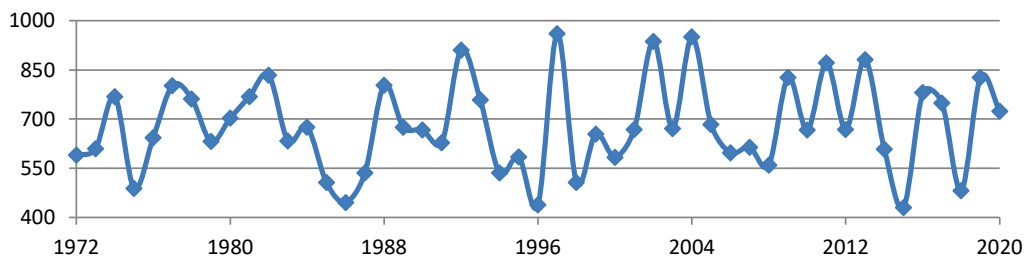
b



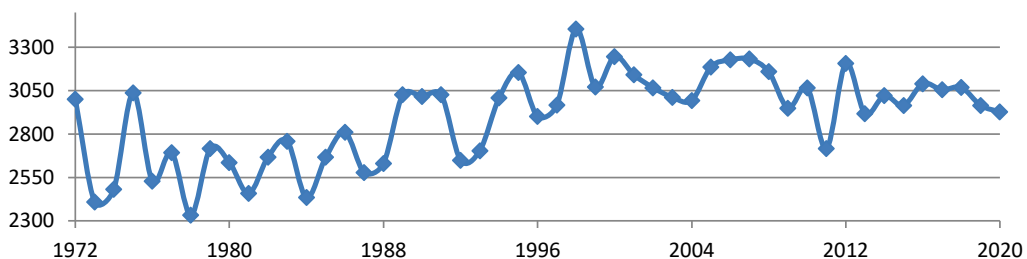
c

**Рис. 1.** Динамика изменения активной температуры воздуха (а), °С, количества осадков (в), мм, и урожайности озимой пшеницы (с), ц/га

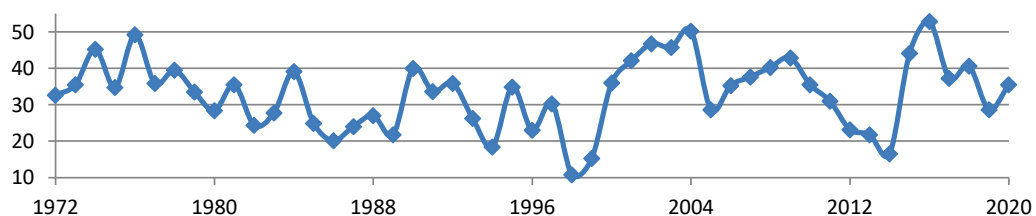
**Fig. 1.** Dynamics of changes in active air temperature (a), °C, rainfall (b), mm, and winter wheat yield (c), c/ha



а



б



с

**Рис. 2.** Динамика изменения активной температуры воздуха (а), °С, количества осадков (б), мм, и урожайности кукурузы (с), ц/га

**Fig. 2.** Dynamics of changes in active air temperature (a), °C, rainfall (b), mm, and corn yield (c), c/ha

## Список отобранных сетей после обучения/ List of selected networks after training

Index	Profile	Train Perf	Select Perf	Test Perf	Train Err	Select Err	Training/ Memebers	Inputs	Hidden (1)	Hidden (2)
1	MLP s5:10–7–1–1	0,482	1,359	0,114	0,432	0,368	BP100, CG20, C	2	7	0
2	GRNN s5 2: 10–2	0,662	1,022	0,111	0,255	0,266	SS	2	21	2
3	GRNN s6 2: 12–2	0,526	1,027	0,088	0,248	0,259	SS	2	21	2
4	RBF s5: 10–2–1–1	0,979	1,004	0,164	0,243	0,281	KM, KN, PI	2	2	0
5	RBF s5: 10–1–1–1	0,965	1,004	0,162	0,239	0,289	KM, KN, PI	2	1	0

Продолжая процесс решения поставленной задачи, по данным следующих 9 лет запустили тестирование, по данным последних 9 лет — контроль выбранных 5 сетей. Задали формат представления итоговых результатов.

Фактические и 5 полученных вариантов прогнозных значений урожайности озимой пшеницы на предстоящие годы приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что прогнозные значения урожайности озимой пшеницы по вариантам в динамике близки к фактическим. Следовательно, из этих сетей можно выбрать одну для дальнейшего использования при составлении севооборота на предстоящие годы.

Графические построения нейронных сетей и расчет урожайности зерновых культур с учетом климатических характеристик приведены на рис. 4.

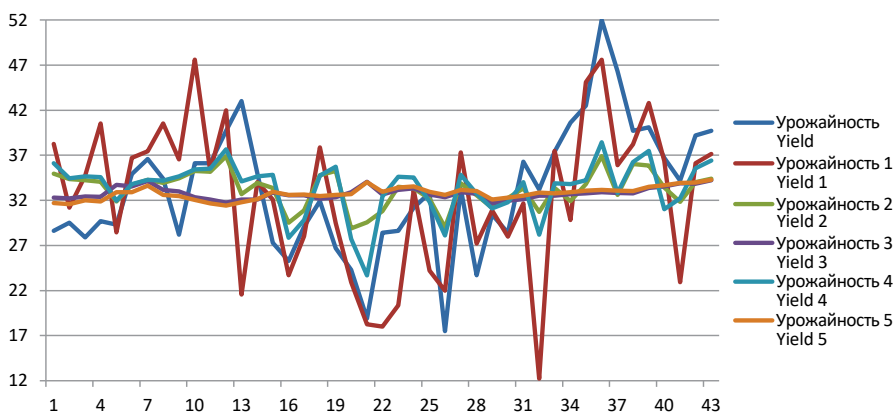


Рис. 3. Фактические и расчетные значения урожайности озимой пшеницы, ц/га

Fig. 3. Actual and calculated winter wheat yield, c/ha



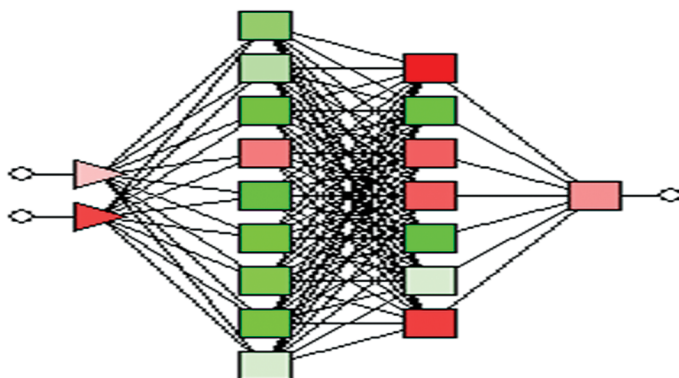


Рис. 4. Структура построения ИНС

Fig. 4. The structure of building Artificial Neural Networks

Программа позволяет построить зависимость урожайности от каждой климатической характеристики (рис. 5).

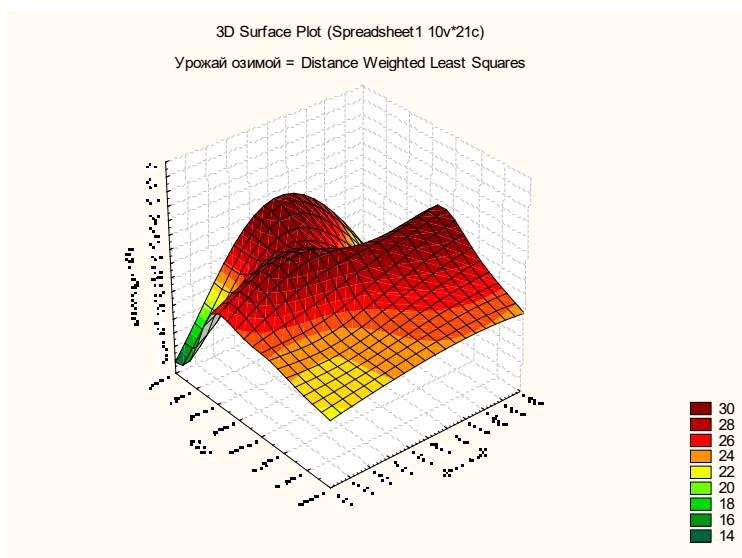


Рис. 5. Описание урожайности озимой пшеницы с учетом климатических характеристик

Fig. 5. Productivity of winter wheat depending on climatic characteristics

По результатам исследований разрабатываются рекомендации для сельхозпроизводителей. Если прогнозные значения урожайности ниже нормы, то указываются меры, которые необходимо предпринять. Требуется проведение дополнительного анализа факторов, обусловивших такой результат. Например, если это низкие осадки, необходимо провести мероприятия по орошению. Если причиной низкого

урожая явились неблагоприятные погодные условия (обильные осадки или град), то необходимо продумать план посева других сельскохозяйственных культур с коротким сроком вегетации [15].

## Заключение

Для моделирования временных рядов с использованием искусственных нейронных сетей была обоснована структура в форме PNN or GRNN (обобщенно-регрессионная нейронная), RBF (радиальные базисные функции) и MLP (многослойный персептрон), выполнены их обучение, тестирование и контроль по исходным данным. В итоге выбрана одна нейронная сеть, которая будет использована для прогнозирования урожайности зерновых культур с учетом природно-климатических и техногенных показателей. Для каждой сельскохозяйственной культуры разработана отдельная нейронная сеть прогнозирования урожайности с учетом климатических характеристик (сумма активной температуры воздуха и осадков) вегетационного периода. Прогнозирование урожайности культур с использованием ИНС может свести риск потери урожая при неблагоприятных условиях к минимуму и добиться наибольших показателей при благоприятных.

Таким образом, для решения задач управления агропромышленным комплексом по прогнозированию урожайности озимой пшеницы и кукурузы на территории Кабардино-Балкарской Республики были решены следующие задачи:

— построены ИНС для прогнозирования урожайности озимой пшеницы с учетом сезонных значений суммарного количества осадков и суммы активной температуры воздуха;

— построены ИНС для прогнозирования урожайности кукурузы с учетом значений суммарного количества осадков и суммы активной температуры воздуха в период вегетации;

— результаты расчета модельных значений урожайности сельскохозяйственной культуры указывают на то, что урожай в предстоящие годы будет стабильным, хотя результаты по двум моделям показывают резкие колебания, а в 2027 г. урожай может погибнуть.

## Библиографический список

1. *Рогачев А.Ф., Шубков М.Г.* Оценка прогнозного уровня урожайности сельскохозяйственных культур на основе нейросетевых моделей динамики // Известия Нижневолжского агропромышленного университетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 4(28). С. 1—6.
2. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. М.: Вильямс М, 2006. 1104 с.
3. *Борисенков Е.П.* Связь температуры и осадков с урожайностью // Труды ГГО. 1984. Вып. 471. С. 46—50.
4. *Fukui H.* Climatic variability and agriculture in tropical moist regions // Proceedings of the world climate Conference / WMO. 1979. № 537. Pp. 426—476.
5. *Мирмович Э.Г., Жаренов А.Б.* Анализ проблемы поддержки выработки решений на действия в кризисных ситуациях в условиях неопределенности // Технологии гражданской безопасности. 2007. № 3(13). С. 82—89.

6. Wongo M., Link P., Troore S.B., Sanon M., Kunstmann H. A crop model and fuzzy rule based approach for optimizing maize planting dates in Burkina Faso, West Africa // *Journal of applied meteorology and climatology*. 2014. Vol. 53. P. 598—613. doi: 10.1175/JAMC-D-130116.1
7. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Режим доступа: <http://www.matlab.exponenta.ru>
8. Мирмович Э.Г. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций и рисков как научно-практическая задача // *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*. М.: ВИНТИ, 2003. Вып. 1. С. 142—146.
9. Заде Л.А. Основы полного подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. Математический сборник. М.: Знание, 1974. С. 5—19.
10. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / под ред. В.П. Боровикова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия—Телеком, 2008. 392 с.
11. Лозовой Я.С., Секирин А.И. Решение задачи прогнозирования с помощью нейронных сетей. Режим доступа [http://www.rusnauka.com/1\\_NIO\\_2011/Informatica/78176.doc.htm](http://www.rusnauka.com/1_NIO_2011/Informatica/78176.doc.htm)
12. Савин И.Ю., Статакис Д., Нэгр Т., Исаев В.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур с использованием нейронных сетей // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2007. № 6. С. 11—14.
13. 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. № 15(2). С. 123—133. doi: 10.22363/2312-797X-2020-15-2-123-133
14. Bischokov R., Didanova E., Trukhachev V., Marzhokhova M. Method of minimizing the risk of reducing the production of agricultural products by means of fuzzy logic // *Advances in Intelligent Systems Research*. Vol. 167. International Scientific and Practical Conference «Digitization of Agriculture—Development Strategy» (ISPC 2019). Pp. 401—404. doi: 10.2991/ispc-19.2019.89
15. Бисчоков Р.М., Аджиева А.А., Тхайцухова С.Р. Применение нечеткой логики для анализа рисков в аграрном секторе // *Вестник Курганской ГСХА*. 2014. № 3(11). С. 57—60.

## References

1. Rogachev AF, Shubkov MG. Assessment of the predicted level of crop yield based on neural network models of dynamics. *Proceedings of Lower Volga agro-university complex: science and higher education*. 2012; (4):226—231. (In Russ.)
2. Haykin S. *Neural networks. A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Moscow: Williams publ.; 2006.
3. Borisenkov EP. Connection of temperature and precipitation with yield. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 1984;471:46—50. (In Russ.)
4. Fukui H. Climatic variability and agriculture in tropical moist regions. *Proceedings of the world climate Conference*. 1979;537:426—476.
5. Mirmovich EG, Zharenov AB. Analyses of the decision making support problem on actions in crisis situations in conditions of uncertainty. *Civil security technology*. 2007;(3):88—95. (In Russ.)
6. Wongo M, Link P, Troore SB, Sanon M, Kunstmann H. A crop model and fuzzy rule based approach for optimizing maize planting dates in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2014;53(3):598—613. doi: 10.1175/JAMC-D-130116.1
7. Stovba SD. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku* [Introduction to fuzzy set theory and fuzzy logic]. Available from: <http://www.matlab.exponenta.ru> [Accessed 5<sup>th</sup> August 2020]. (In Russ.)
8. Mirmovich EG. Forecasting of emergencies and risks as a scientific and practical task. *Safety and emergencies problems*. 2003;(1):142—146. (In Russ.)
9. Zade LA. Fundamentals of a complete approach to the analysis of complex systems and decision-making processes. In: *Matematika segodnya*. Moscow: Znanie publ.; 1974. p.5—19. (In Russ.)
10. Borovikov VP. (ed.) *Neironnye seti. STATISTICA Neural Networks: Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh* [Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and Technologies of Modern Data Analysis]. 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom publ.; 2008. (In Russ.)
11. Lozovoy YS, Sekirin AI. Solving the problem of prediction using neural networks. Available from: [http://www.rusnauka.com/1\\_NIO\\_2011/Informatica/78176.doc.htm](http://www.rusnauka.com/1_NIO_2011/Informatica/78176.doc.htm) [Accessed 16<sup>th</sup> August 2020]. (In Russ.)
12. Savin IY, Statakis D, Nagr T, Isaev VA. Forecasting farm crop yields by the use of neural networks. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2007;(6):11—14. (In Russ.)

13. Bischokov RM. Analysis, modeling and forecast of crop yields for the Kabardino-Balkarian Republic using fuzzy logic apparatus. *RUDN journal of agronomy and animal industries*. 2020;15(2):123–133. (In Russ.) doi: 10.22363/2312–797X-2020-15-2-123-133
14. Bischokov R, Didanova E, Trukhachev V, Marzhokhova M. Method of minimizing the risk of reducing the production of agricultural products by means of fuzzy logic. Atlantis Press. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2019;167:401–404. doi: 10.2991/isp-19.2019.89
15. Bischokov RM, Adzhiyeva AA, Thaytsukhova SR. Application of fuzzy logic for risk analysis in agrarian sector. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2014;(4):57–60. (In Russ.)

**Об авторе:**

*Бисчокков Руслан Мусарбиевич* — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и информатики, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, Российская Федерация, 360012, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр-кт Ленина, д. 2 в; e-mail: rusbis@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-6694-319X

**About author:**

*Bischokov Ruslan Musarbievich* — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Informatics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University, 2v Lenin av., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360012, Russian Federation; e-mail: rusbis@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-6694-319X