

DOI 10.31029/vestdnc96/6

УДК 631.45:633:11

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ
НА ОСНОВЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ И АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО
ПРИАЗОВСКОЙ ЗОНЫ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Э. А. Гаевая, ORCID: 0000-0001-9279-1070

О. С. Безуглова, ORCID: 0000-0003-4180-4008

Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Россия

**FORECASTING THE YIELD OF WINTER WHEAT BASED
ON THE AGROPHYSICAL AND AGROCHEMICAL PROPERTIES
OF ORDINARY CHERNOZEM
OF THE AZOV ZONE OF THE ROSTOV REGION**

E. A. Gaevaya, ORCID: 0000-0001-9279-1070

O. S. Bezuglova, ORCID: 0000-0003-4180-4008

Federal Rostov Agricultural Research Centre, Rassvet village, Russia

Аннотация. Исследования были проведены в длительном полевом опыте в 2019–2022 гг. на эрозионно-опасном склоне юго-восточной экспозиции крутизной до 3,5–4° балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области. Установлена тесная положительная корреляция между урожайностью зерна озимой пшеницы и влажностью почвы ($r = 0,76$), а также содержанием элементов питания: нитратным ($r = 0,86$) и аммонийным ($r = 0,75$) азотом, подвижным фосфором ($r = 0,44$), обменным калием ($r = 0,47$), гумусом ($r = 0,46$). Зависит урожайность и от таких показателей, как количество агрономически ценных агрегатов ($r = 0,47$). Отрицательная корреляция установлена между урожайностью и такими специальными показателями водной эрозии, как сток ($r = -0,54$) и смыл ($r = -0,46$). Определены максимальные и минимальные пределы колебания значений показателей параметров почвенного плодородия и урожайности озимой пшеницы. На основе корреляционно-регрессионного анализа составлена мультипараметрическая модель прогнозирования урожайности озимой пшеницы по агрохимическим и агрофизическим свойствам чернозема обыкновенного. Предложенное уравнение имеет высокую достоверность аппроксимации между фактической и теоретической урожайностью озимой пшеницы ($R^2 = 0,98$). Полученную модель можно использовать для повышения эффективности удобрений, предотвращения деградационных процессов, происходящих на среднееродированных черноземах обыкновенных, повышения прибыли производства сельскохозяйственной продукции и сокращения затрат на восстановление почвенного плодородия.

Abstract. The research was conducted in a long-term field experiment in 2019–2022 on the erosion-prone slope of the southeastern exposure with a steepness of up to 3.5–4° of the Bolshoy Log gulch in the Aksai district of the Rostov region. A close positive correlation has been established between soil moisture ($r = 0.76$), nitrate ($r = 0.86$) and ammonium ($r = 0.75$) nitrogen, the amount of agronomically valuable aggregates ($r = 0.47$), mobile phosphorus ($r = 0.44$), exchangeable potassium ($r = 0.47$), runoff ($r = -0.54$) and flushing ($r = -0.46$), humus ($r = 0.46$) and grain yield of winter wheat. The maximum and minimum limits of fluctuations in the values, parameters of soil fertility and yield of winter wheat have been determined. Based on correlation and regression analysis, a multi-parametric model for predicting winter wheat yields based on the agrochemical and agrophysical properties of common chernozem has been compiled. The proposed equation has a high approximation reliability between the actual and theoretical yields of winter wheat ($R^2 = 0.98$). The obtained model can be used to increase the efficiency of fertilizers, prevent degradation processes occurring on medium-eroded common chernozems, increase the profit of agricultural production and reduce the cost of restoring soil fertility.

Ключевые слова: урожайность, агрофизические свойства, агрохимические свойства, чернозем обыкновенный, корреляционно-регрессионный анализ, мультипараметрическая модель.

Keywords: productivity, agrophysical properties, agrochemical properties, common chernozem, correlation and regression analysis, multi-parametric model.

В последние годы наблюдается устойчивый рост урожайности сельскохозяйственных культур, в частности озимой пшеницы [1]. На этом фоне одна из основных задач почвоведения – сохранение и рациональное использование плодородия почв – приобретает еще большую актуальность. Для увеличения урожайности необходимо обеспечить систематический возврат в почву основных элементов питания растений [2, 3]. Критерием оценки плодородия служит обеспеченность почв доступными для них элементами питания – прежде всего гумуса и азота, фосфора, калия, так как недостаток этих элементов отрицательно влияет на

урожайность [4,5]. Внедрение прогнозирования направлено на достижение рационального использования земель сельскохозяйственного назначения с учетом актуального и потенциального плодородия пахотных почв и поддержание положительного баланса элементов питания [6].

Связь между агрохимическими, агрофизическими свойствами почвы и урожайностью культур можно установить при построении различных моделей. Начало таким исследованиям положил И.И. Карманов [7], предложив среди основных показателей плодородия использовать содержание гумуса, используемого в качестве главного критерия, а также основных элементов питания растений. Внедрение интенсивного земледелия, основой которого является систематическое применение минеральных удобрений и средств защиты растений, позволяет получать высокие урожаи. Прогнозирование урожаев сельскохозяйственных культур, учитывающее содержание фосфора и калия, а также количество внесенных минеральных удобрений, позволяет наиболее точно определить выход продукции и количество понесенных затрат. Такой подход программирования урожаев культур приведен в работе М.К. Каюмова [8]. В последние годы прогнозирование урожайности культур с использованием показателей плодородия почвы, внесенных удобрений, погодных условий были использованы в работах многих ученых: А.А. Лукманова [9], И.Д. Давлятшина [10], О.А. Бирюковой [11], В.А. Прошкина [12], Н.Б. Бакирова [13]. Такой подход представляет теоретическую и практическую базу управления почвенным плодородием, получения планируемых урожаев при высокой экономической эффективности сельскохозяйственного производства.

Цель данной работы – выявление зависимости и построение мультипараметрической модели урожайности озимой пшеницы от параметров агрохимического и агрофизического состояния агрочерноземов Приазовской зоны Ростовской области.

Материалы и методы

Полевые исследования проводили в 2019–2022 гг. в длительном полевом эксперименте на эрозионно-опасном склоне юго-восточной экспозиции крутизной до 3,5–4° балки Большой Лог Аксайского района Ростовской области. Опыт зарегистрирован в Российской Географической сети длительных опытов с удобрениями (аттестат № 169).

Почвенный покров участка представлен черноземом обыкновенным карбонатным среднесмытым среднemosным малогумусным тяжелосуглинистым на лессовидном суглинке [14]. Согласно международной классификации WRB почва диагностируется как Calcic Chernozem (Loamic, Pachic) [15]. Мощность $A_{\text{пах}}$ – 25–30 см, $A+B$ – от 40 до 60 см – в зависимости от смывости. Горизонт А имеет зернистую структуру, АВ – ореховато-комковатую и зернисто-комковатую. Вскипают почвы с поверхности или в верхней части гумусового горизонта. С той же глубины появляются новообразования карбонатов, вначале в виде мицелия, потом в виде прожилок. На глубине 120 см или глубже залегает белоглазка.

Объектами исследования служила почва под озимой пшеницей, посеянной по различным предшественникам: чистый пар, озимая пшеница, горох, кукуруза. Минеральные удобрения вносили в дозе $N_{46}P_{30}K_{30}$ (106 кг д.в. на 1 га севооборотной площади). Использовали две системы обработки почвы: чизельную и отвальную обработку под предшествующую культуру. Учет урожая по вариантам опыта проводили с учетной площади 50 м² методом прямого комбинирования с последующим взвешиванием в трехкратной повторности [16].

Физические свойства почвы определяли по общепринятым методикам: продуктивную влагу в слое почвы 0–30 см [17]; агрегатный состав почвы – в образцах с ненарушенной структурой по методу Савинова (сухое просеивание) [18]; сток талой и ливневой воды методом микроплощадок [19]; определение смыва и размыва почвы измерением объема водороев – метод Н.В. Дьякова [20].

Агрохимические свойства почвы: гумус определяли по методу Тюрина, в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26213-2021 [21]; содержание подвижных элементов питания $N-NO_3$; $N-NH_4$ [22, 23]; фосфор и калий по Мачигину [24].

Математическую обработку полученных результатов проводили с использованием Microsoft Excel и программы Statistica 13.3 [25].

Результаты исследований

Наибольшая урожайность озимой пшеницы была по предшественнику чистый пар (5,02–5,05 т/га), так как водный режим и плодородие почвы под ним были наилучшими [26]. Вторым по значимости предшественником озимой пшеницы является горох, однако урожайность на этом варианте незначительно уступает варианту озимая пшеница, посеянная по чистому пару (на 10,3–13,9%). На непаровых

предшественниках озимой пшеницы (озимая пшеница и кукуруза) урожайность значительно ниже – на 21,5–29,9 %.

Способ обработки почвы незначительно влиял на урожайность озимой пшеницы, разница между урожайностью на отвальной вспашке и чизельной составляла 0,11–0,14 т/га и была статистически незначима при НСР₀₅ – 0,19–0,22 т/га (табл. 1).

Таблица 1. Урожайность озимой пшеницы в зависимости от предшественника и способа обработки почвы, т/га

Предшественник	Способ обработки почвы	
	чизельная	отвальная
Чистый пар	5,02	5,05
Озимая пшеница	3,52	3,63
Горох	4,50	4,35
Кукуруза	3,82	3,97
НСР ₀₅ 0,19–0,22 т/га		

Проведение корреляционного анализа выявило, что урожайность озимой пшеницы в большей степени зависит: от влажности почвы ($r = 0,76$), содержания нитратного ($r = 0,86$) и аммонийного ($r = 0,75$) азота. В меньшей степени на урожайность влияет структурность почвы ($r = 0,47$), содержание подвижного фосфора ($r = 0,44$), обменного калия ($r = 0,47$), гумуса ($r = 0,46$). Отрицательная корреляция урожайности и стока воды ($r = -0,54$), а также смыва почвы ($r = -0,46$) показывает не только направление процессов деградации, но и подтверждает негативное влияние этих процессов на плодородие и урожайность основной культуры южных регионов – озимой пшеницы.

Наиболее нестабильными признаками, оказывающими влияние на урожайность, являются сток воды и смыв почвы. Коэффициент вариации по этим признакам $C_v > 25$ % считается значительным (соответственно 58,0 и 47,2%). Такие показатели, как влажность почвы (14,9%), содержание нитратного азота (16,6%) и аммонийного азота (15,7%), считаются средними. По остальным показателям коэффициент вариации не превышает 10 %, вариабельность слабая. К ним относятся физические свойства почвы (количество агрономически ценных агрегатов, плотность, водопроницаемость, гребнистость), по сравнению с агрохимическими свойствами это более устойчивые показатели (табл. 2).

Таблица 2. Агрохимические и агрофизические показатели чернозема обыкновенного под озимой пшеницей в слое почвы 0–30 см

Показатель	Пределы колебаний		Среднее значение	Коэффициент	
	min	max		корреляции, (r)	вариации, (Cv) %
Урожайность (У), т/га	3,32	5,80	4,7	–	15,6
Количество агрегатов 10–0,25 мм, %	70,0	87,6	78,2	0,47	7,9
Влажность почвы, мм	32,3	45,4	34,9	0,76	14,9
N-NH ₄ , мг/кг	7,0	14,0	10,6	0,85	16,6
N-NO ₃ , мг/кг	7,1	12,8	8,4	0,75	15,7
P ₂ O ₅ , мг/кг	32,2	45,0	36,9	0,44	8,8
K ₂ O, мг/кг	330	420	370	0,47	8,4
Сорг., %	3,64	3,90	3,8	0,46	1,7
Сток, мм	5,3	44,8	18,0	–0,54	58,0
Смыв, т/га	2,0	10,6	4,8	–0,46	47,2
Гребнистость, %	9,2	9,8	9,5	0,11	2,0
Плотность, г/см ³	1,08	1,13	1,10	0,33	1,5
Водопроницаемость, мм/мин	1,2	1,6	1,3	0,44	9,9
Общий азот, %	0,21	0,22	0,22	0,01	5,1
Ca, мг-экв/100 г	23,6	26,1	25,3	0,36	3,0
Mg, мг-экв/100 г	2,3	4,6	3,1	–0,22	28,1

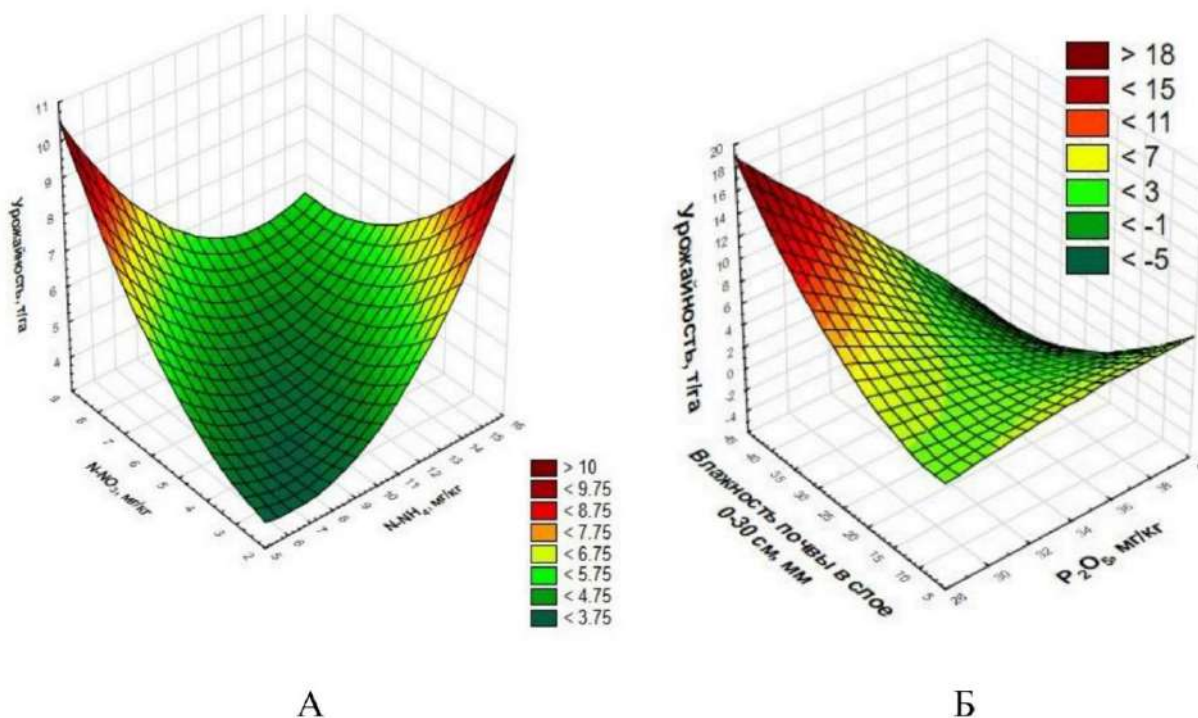
Также были определены максимальные и минимальные пределы колебания показателей почвенного плодородия и урожайности.

Для анализа были отобраны девять основных агрофизических и агрохимических показателей чернозема обыкновенного и была выявлена корреляционная связь этих показателей с урожайностью озимой пшеницы. Модель построена для значений показателей чернозема обыкновенного в пахотном слое почвы и среднего уровня применения удобрений под озимую пшеницу. Построенное уравнение множественной регрессии имеет высокую достоверность аппроксимации, которая между фактической и теоретической урожайностью озимой пшеницы составила 0,98.

Ниже представлено уравнение множественной регрессии, описывающее зависимость урожайности озимой пшеницы от параметров почвенного плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного с использованием девяти аргументов (количество агрономически ценных агрегатов (Ag), влажность почвы (W), содержание нитратного (NO_3) и аммонийного азота (NH_4), подвижного фосфора (P_2O_5) и обменного калия (K_2O), гумус (C), сток воды (St) и смыв почвы (Sm)):

$$Y = 0,18(\text{NH}_4) - 0,001(\text{NO}_3) - 0,04(\text{P}_2\text{O}_5) + 0,0015(\text{K}_2\text{O}) + 0,02(\text{W}) + \\ + 0,0038(\text{Ag}) - 0,63(\text{C}) - 0,04(\text{St}) + 0,016(\text{Sm}) + 2,60; \\ R^2 = 0,98.$$

Практический смысл составленной модели состоит в том, что она позволяет прогнозировать предполагаемую урожайность озимой пшеницы при определении агрофизических и агрохимических показателей почвенного плодородия, в указанных пределах, представленных в табл. 2.



Зависимость урожайности озимой пшеницы от агрохимических и агрофизических показателей почвы
(А – содержание нитратного и аммонийного азота, Б – влажность почвы и содержание подвижного фосфора)

Построенные многомерные модели зависимости урожайности от факторов плодородия почвы выявили, что она прямо зависит от влажности почвы, азотного и фосфатного режимов почвы. При содержании в почве минерального азота свыше 25 мг/кг возможно получить урожайность озимой пшеницы более 10 т/га. При увеличении влажности почвы свыше 40 мм и подвижных фосфатов более 40 мг/кг также можно получить урожайность более 18 т/га. Выявлено также большее влияние на урожайность озимой пшеницы влажности почвы по сравнению с содержанием подвижных фосфатов, что подтверждает положение о достаточном обеспечении чернозема обыкновенного фосфором [27]. Однако в нашем случае пределы составления прогноза ограничены значениями урожайности от 3,32 до 5,8 т/га и содержанием минерального азота в почве – до 14 мг/кг, подвижного фосфора – до 45,0 мг/кг и влажностью почвы в слое почвы 0–30 см до 42 мм. Выше этих пределов полученные значения недостоверны (см. рисунок).

Практическое значение данной мультипараметрической модели параметров почвенного плодородия заключается в повышении эффективности удобрений и оптимальном их использовании. Полученную модель можно использовать для расчета повышения эффективности удобрений, предотвращения деградационных процессов, происходящих на среднеэродированных черноземах обыкновенных, повышения прибыли производства сельскохозяйственной продукции и сокращения затрат на восстановление почвенного плодородия [28, 29].

Заключение

Таким образом, выделены девять интегральных агрохимических и агрофизических факторов плодородия почвы, в наиболее значимой степени влияющих на его уровень и урожайность озимой пшеницы: количество агрономически ценных агрегатов 10–0,25 мм, влажность почвы, содержание нитратного и аммонийного азота, подвижного фосфора и обменного калия, гумуса, стока воды и смыва почвы. На основании выделенных факторов построена мультипараметрическая модель параметров почвенного плодородия чернозема обыкновенного среднеэродированного, позволяющая прогнозировать урожайность озимой пшеницы и имеющая высокую достоверность аппроксимации ($R^2 = 0,98$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Таркинский В.Е., Иванов А.Б., Петухов Д.А., Бондаренко Е.В., Труфляк Е.В. К вопросу прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Техника и оборудование для села. 2022. № 11(305). С. 18–22. DOI 10.33267/2072-9642-2022-11-18-22.
2. Билтуев А.С., Гаркушева Н.М., Хутакова С.В., Цыбенков Б.Б. Прогнозирование урожайности пшеницы при применении удобрений в условиях сухой степи Бурятии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 8(130). С. 5–9.
3. Сычев В.Г., Шафран С.А. Прогноз плодородия почв Нечерноземной зоны в зависимости от уровня применения удобрений // Плодородие. 2019. № 2(107). С. 22–25. DOI 10.25680/S19948603.2019.107.07.
4. Невенчанная Н.М., Аксенова Ю.В. Исследование продуктивности и прогнозирование урожайности яровой пшеницы с использованием технологий дистанционного зондирования земли // Земледелие. 2023. № 2. С. 24–31. DOI 10.24412/0044-3913-2023-2-24-31.
5. Андреева Д.М., Леонов Ф.Н. Прогнозирование урожаев сельскохозяйственных культур по баллу пашни и влагообеспеченности территории // Мелиорация. 2006. № 1(55). С. 103–105.
6. Аввакумов О.В., Лукманов А.А., Давлятишин И.Д. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы в лесостепной зоне Среднего Поволжья по методу наименьших квадратов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2013. Т. 8, № 4(30). С. 92–98. DOI 10.12737/2167.
7. Карманов И.И. Плодородие почв СССР (природные закономерности и количественная оценка). М.: Колос, 1980. 224 с.
8. Каюмов М.К. Программирование продуктивности полевых культур. М.: Росагропромиздат, 1989. 288 с.
9. Лукманов А.А., Переведенцев Ю.П., Мустафина А.Б., Ибатуллин И.М., Зарипов Д.Ф. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по агрохимическим свойствам в условиях Тетюшского района Республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 3(71). С. 39–45. DOI 10.12737/2073-0462-2023-39-45.
10. Давлятишин И.Д., Лукманов А.А. Временной ряд урожайности яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и ее прогнозирование по агрохимическим факторам в лесостепи среднего Поволжья // Проблемы агрохимии и экологии. 2016. № 1. С. 29–36.
11. Бирюкова О.А., Ельников И.И., Божков Д.В. Прогнозирование продуктивности озимой пшеницы на черноземе обыкновенном // Успехи современного естествознания. 2013. № 7. С. 150–151.
12. Прошкин В.А., Адрианов С.Н., Шаброва Е.В. Модель прогноза прибавки урожайности озимой пшеницы при применении фосфорных удобрений // Агрохимия. 2011. № 6. С. 19–26.
13. Бакиров, Н.Б., Давлятишин И.Д. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по содержанию фосфора и калия в почвах // Плодородие. 2007. № 1(34). С. 12–13.
14. Классификация и диагностика почв СССР / сост.: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова [и др.]; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М.: Колос, 1977. 223 с.
15. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. №. 106. FAO, Rome.

16. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 4-е перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.
17. ГОСТ 82268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Дата введения 1990-06-01. М.: Стандартинформ, 2006. 6 с.
18. *Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М.* Практикум по земледелию. М.: Колос, 1987. 384 с.
19. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почвы при изучении водной эрозии. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 88 с.
20. *Дьяков В.Н.* Совершенствование метода учета смыва почв по водоразделам // Почвоведение. 1984. № 3. С. 146–148.
21. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Дата введения 2022-08-01. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.
22. ГОСТ 26489-85. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. Дата введения 1985-03-26. М.: Издательство стандартов, 1985. 5 с.
23. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. Дата введения 1986-06-30. М.: Издательство стандартов, 1986. 10 с.
24. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. Дата введения 1993-07-01. М.: Стандартинформ, 1998. 10 с.
25. StatSoft, Inc. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 13. 2020. Available online: URL: <https://web.archive.org/web/20131213145004/>. / (дата обращения: 01.03.2025).
26. *Листопадов И.Н., Гаевая Э.А., Игнатьев Д.С., Мищенко А.Е.* Водный режим под озимой пшеницей в севооборотах на эрозионно опасном склоне // Земледелие. 2012. № 1. С. 6–8.
27. *Гаевая Э.А., Ильинская И.Н., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н.* Изменение фосфорно-калийного режима черноземов обыкновенных в длительном опыте Ростовской области // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2(50). URL: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_202.pdf (дата обращения: 03.02.2025).
28. *Гаевая Э.А.* Влияние различных норм удобрений и способов обработки почвы на урожайность озимой пшеницы в Приазовской зоне Ростовской области // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 2(9). С. 11–16.
29. *Дмитриев С.А., Кравченко Р.В., Бардак Н.И.* Вариабельность действия минеральных удобрений на фоне основной обработки почвы в технологии возделывания озимой пшеницы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 186. С. 31–40.

Поступила в редакцию 21.02.2025 г.
Принята к печати 26.03.2025 г.

Гаевая Эмма Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный Ростовский аграрный научный центр; e-mail: emmaksay@inbox.ru

Emma A. Gaevaya, Candidate of Biology, leading researcher, Federal Rostov Agricultural Research Centre; e-mail: emmaksay@inbox.ru

Безуглова Ольга Степановна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный Ростовский аграрный научный центр; e-mail: lola314@mail.ru

Olga S. Bezuglova, Doctor of Biology, professor, main researcher, Federal Rostov Agricultural Research Centre; e-mail: lola314@mail.ru