

УДК 519.8, 51-7

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (биологические науки, сельскохозяйственные науки)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЕДНЕЙ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР МЕТОДАМИ ПАРНОЙ И МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ И КОРРЕЛЯЦИИ

Удинцова Надежда Михайловна
кандидат технических наук, доцент
РИНЦ SPIN-код: 2798-3902
udinczowa@yandex.ru

*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, г.
Зерноград, Ростовская область, Россия*

Жидченко Татьяна Викторовна
Кандидат технических наук, доцент
РИНЦ SPIN-код: 2162-3997
tvzh@inbox.ru
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, г.
Зерноград, Ростовская область, Россия*

Серёгина Виктория Викторовна
кандидат социологических наук, доцент
РИНЦ SPIN-код: 8596-4058
vic.victora@yandex.ru
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, г.
Зерноград, Ростовская область, Россия*

Середина Марина Николаевна
Кандидат технических наук, доцент
РИНЦ SPIN-код: 3932-2192
smn1472@yandex.ru
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, г.
Зерноград, Ростовская область, Россия*

Украинцев Максим Михайлович
Кандидат технических наук, доцент
РИНЦ SPIN-код: 7579-7583
rostmax@rambler.ru
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, г.
Зерноград, Ростовская область, Россия*

Зерновое производство является основой сельского хозяйства Ростовской области. Повышение урожайности представляет задачу, которая остается актуальной как для производителей, так и для потребителей, поскольку урожайность зерновых культур является одним из показателей, формирующих их цену, а, следовательно, и

UDC 519.8, 51-7

4.1.2. Plant breeding, seed production and biotechnology (biological sciences, agricultural sciences)

FORECASTING AVERAGE GRAIN CROP YIELD USING PAIRED AND MULTIPLE REGRESSION AND CORRELATION METHODS

Udintsova Nadezhda Mikhailovna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 2798-3902
udinczowa@yandex.ru

*The Azov-Black Sea Engineering Institute FSBE HE
«Don State Agrarian University», in Zernograd,
Zernograd, Rostov region, Russia*

Zhidchenko Tatiana Viktorovna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 2162-3997
tvzh@inbox.ru
*The Azov-Black Sea Engineering Institute FSBE HE
«Don State Agrarian University», in Zernograd,
Zernograd, Rostov region, Russia*

Seregina Victoria Viktorovna
Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 8596-4058
vic.victora@yandex.ru
*The Azov-Black Sea Engineering Institute FSBE HE
«Don State Agrarian University», in Zernograd,
Zernograd, Rostov region, Russia*

Seredina Marina Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 3932-2192
smn1472@yandex.ru
*The Azov-Black Sea Engineering Institute FSBE HE
«Don State Agrarian University», in Zernograd,
Zernograd, Rostov region, Russia*

Ukraintsev Maxim Mikhailovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 7579-7583
rostmax@rambler.ru
*The Azov-Black Sea Engineering Institute FSBE HE
«Don State Agrarian University», in Zernograd,
Zernograd, Rostov region, Russia*

Grain production is the basis of agriculture in the Rostov region. Increasing yields remains a relevant task for both producers and consumers, as grain yield is a factor in their price and, consequently, the cost of products made from them. Many factors can affect grain yield, including seed quality, soil characteristics, fertilizers and their quantity, and climatic conditions.

стоимость продукции, вырабатываемой из них. На урожайность зерновых культур могут оказывать влияние множество различных факторов. Это и посевные качества семян, и характеристики почвы, вносимые удобрения и их количество, климатические условия и др. Целью данной работы является анализ средней урожайности зерновых культур Зерноградского района Ростовской области от климатических условий (температуры окружающего воздуха и количества осадков в период произрастания), а также исследование совместного влияния этих факторов и их взаимной корреляции на урожайность. Для исследования использовались данные за последние 10 лет по Зерноградскому району Ростовской области. В ходе исследования получены модели парной линейной и нелинейной регрессии, модель множественной линейной регрессии и проведен их сравнительный анализ на основании ошибок аппроксимации, индексов корреляции и детерминации, коэффициентов эластичности. Статистическая значимость моделей и входящих в них факторов оценивалась на основании критерия Фишера. Такой подход позволяет прогнозировать среднюю урожайность любых культур в зависимости от различных интересующих исследователя факторов

Ключевые слова: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ, ПАРНАЯ РЕГРЕССИЯ, МНОЖЕСТВЕННАЯ РЕГРЕССИЯ, КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ЗЕРНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ, СРЕДНЯЯ УРОЖАЙНОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА, КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ, ОШИБКА АППРОКСИМАЦИИ, КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ, ЗЕРНОГРАДСКИЙ РАЙОН, РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ

The aim of this work is to analyze the average yield of grain crops in the Zernograd district of the Rostov region based on climatic conditions (ambient temperature and precipitation during the growing season), as well as to study the combined effect of these factors and their mutual correlation on yield. The study used data for the last 10 years for the Zernograd district of the Rostov region. The study obtained models of paired linear and nonlinear regression, a multiple linear regression model, and conducted their comparative analysis based on approximation errors, correlation and determination indices, and elasticity coefficients. The statistical significance of the models and the factors included in them was assessed based on the Fisher criterion. This approach allows predicting the average yield of any crop depending on various factors of interest to the researcher

Keywords: YIELD FORECASTING, PAIRED REGRESSION, MULTIPLE REGRESSION, CORRELATION ANALYSIS, GRAIN CROPS, AVERAGE YIELD, AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, APPROXIMATION ERROR, CORRELATION COEFFICIENT, ZERNOGRAD DISTRICT, ROSTOV REGION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-210-042>

Выращивание зерновых культур является одним из основных направлений сельскохозяйственного производства Ростовской области. Одни и те же сельскохозяйственные культуры возделываются в различных условиях. Количество и качество сельскохозяйственной продукции при этом будут различны. Это обуславливается погодно-климатическими условиями (температура воздуха, количество осадков и др.), качеством почвы, вносимыми удобрениями и прочими факторами [1, 2, 3]. С целью прогнозирования ожидаемой средней урожайности применяют различные математические методы анализа и моделирования зависимости

<http://ej.kubagro.ru/2025/06/pdf/42.pdf>

урожайности от различных факторов [4, 5, 6]. Одним из таких методов является корреляционно-регрессионный анализ. Для оценки влияния отдельных факторов на среднюю ожидаемую урожайность, может быть применено моделирование методами парной регрессии и корреляции. В случае множественной регрессии в модель могут быть включены несколько факторов одновременно, что позволяет исследовать влияние на результатив не только каждого фактора, но и их совокупное воздействие. Это важно учитывать, так как многие факторы коррелируют не только с результативом, но и между собой. В данной работе результативом является средняя урожайность зерновых культур, а исследуемыми факторами средняя температура воздуха и среднее количество осадков в период произрастания.

Для исследования были взяты данные Зерноградской метеостанции о среднесуточных температурах и количестве осадков за последние 10 лет, а также данные о средней урожайности зерновых культур в Зерноградском районе Ростовской области за те же годы.

В результате исследований были получены математические модели зависимости средней урожайности (результатив Y) от средней температуры воздуха (фактор X_1) и среднего количества осадков (фактор X_2) в период произрастания зерновых культур. Затем был проведен их сравнительный анализ методами парной корреляции [5, 7, 8].

В таблице 1 приведены результаты расчетов для зависимостей средней урожайности от средних температур воздуха.

Все рассматриваемы модели статистически значимы по критерию Фишера. Анализируя полученные модели по средним ошибкам аппроксимации и коэффициентам корреляции, очевидно, что наилучшим образом зависимость средней урожайности от средних температур воздуха в период произрастания аппроксимирует уравнение параболической регрессии $\hat{Y} = 571,062 - 52,479X_1 + 1,281X_1^2$. При этом средняя ошибка аппроксимации, характеризующая отклонения теоретических значений

исследуемой величины от эмпирических, равна 4,9%; а коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между X_1 и Y , равен 0,77.

На рисунке 1 изображены графики полученных зависимостей.

Таблица 1 – Уравнения регрессии зависимости средней урожайности (Y) от средних температур воздуха (X_1) и их сравнительные характеристики

Уравнение регрессии	Сравнительные характеристики	
	Средняя аппроксимация ошибка A , %	Коэффициент корреляции R
Линейная регрессия: $\hat{Y} = 87,283 - 2,632X_1$	$A = 6,1\%$	$R = 0,70$
Параболическая регрессия: $\hat{Y} = 571,062 - 52,479X_1 + 1,281X_1^2$	$A = 4,9\%$	$R = 0,77$
Гиперболическая регрессия: $\hat{Y} = -16,129 + \frac{1012,639}{X_1}$	$A = 5,8\%$	$R = 0,72$
Экспоненциальная регрессия: $\hat{Y} = 140,380e^{-0,07X_1}$	$A = 6,2\%$	$R = 0,69$
Степенная регрессия: $\hat{Y} = 2131,2X_1^{-1,376}$	$A = 6,0\%$	$R = 0,71$
Логарифмическая регрессия: $\hat{Y} = 189,48 - 51,71\ln X_1$	$A = 5,9\%$	$R = 0,71$

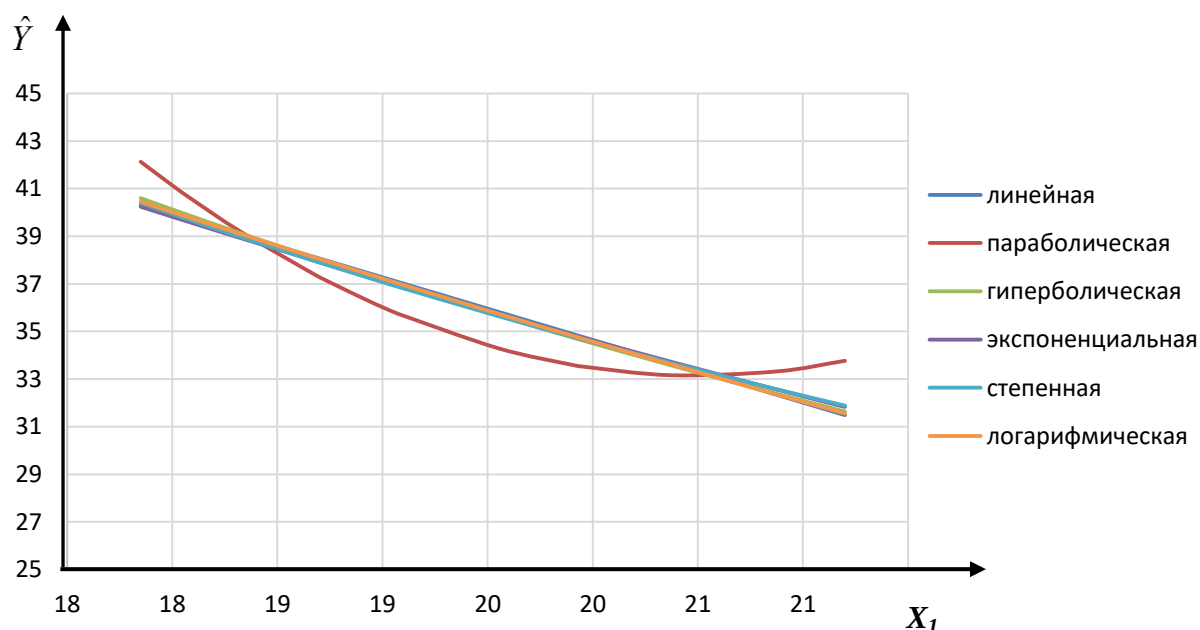


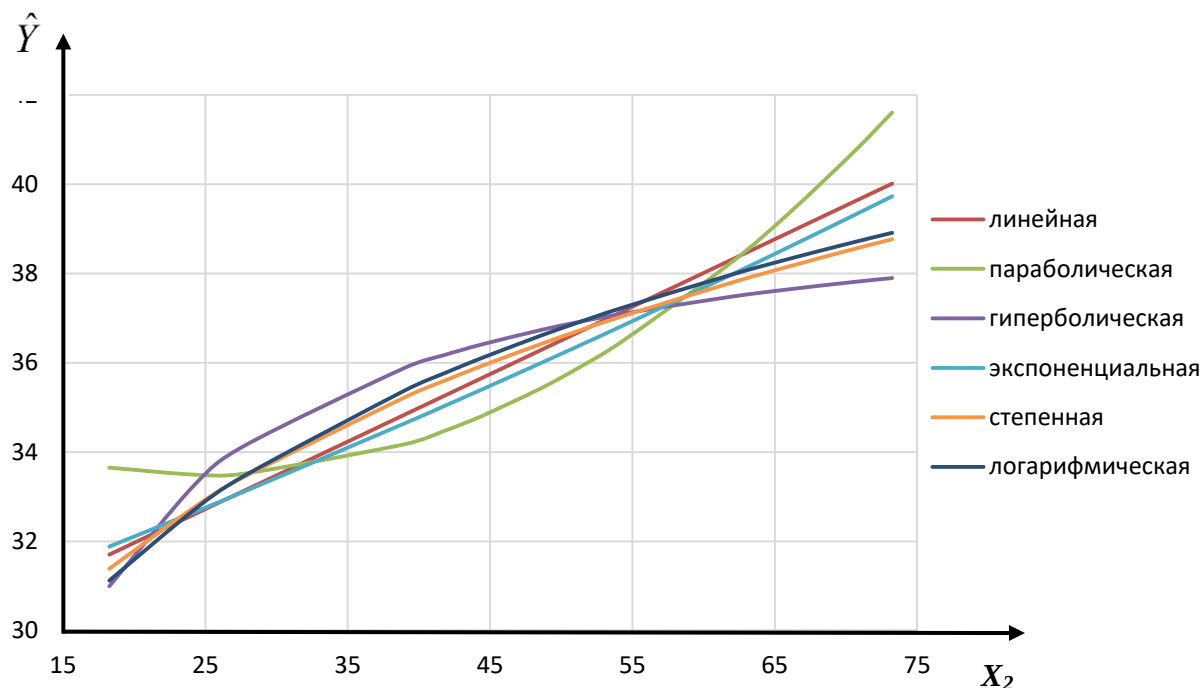
Рисунок 1 – Графики уравнений регрессии зависимости средней урожайности от средних температур воздуха

В таблице 2 приведены результаты расчетов для зависимостей средней урожайности от среднего количества осадков.

Таблица 2 – Уравнения регрессии зависимости средней урожайности (Y) от среднего количества осадков (X_2) и их сравнительные характеристики

Уравнение регрессии	Сравнительные характеристики	
	Средняя ошибка аппроксимации A , %	Коэффициент корреляции R
Линейная регрессия: $\hat{Y} = 28,944 + 0,151X_2$	$A = 4,8 \%$	$R = 0,78$
Параболическая регрессия: $\hat{Y} = 35,670 - 0,174X_2 + 0,0035X_2^2$	$A = 3,9 \%$	$R = 0,84$
Гиперболическая регрессия: $\hat{Y} = 40,187 - \frac{167,788}{X_2}$	$A = 6,0 \%$	$R = 0,71$
Экспоненциальная регрессия: $\hat{Y} = 29,638e^{0,004X_2}$	$A = 5,6\%$	$R = 0,74$
Степенная регрессия: $\hat{Y} = 20,184X_2^{0,152}$	$A = 5,9\%$	$R = 0,72$
Логарифмическая регрессия: $\hat{Y} = 14,843 + 5,605\ln X_2$	$A = 5,8\%$	$R = 0,73$

Рисунок 2 отражает графики полученных зависимостей:



Анализ уравнений регрессии зависимости средней урожайности от среднего количества осадков по средней ошибке аппроксимации и коэффициенту корреляции дал следующие результаты: наилучшим образом данную зависимость аппроксимирует уравнение параболической регрессии $\hat{Y} = 35,670 - 0,174X_2 + 0,0035X_2^2$. При этом средняя ошибка аппроксимации равна 3,9%, а коэффициент корреляции равен 0,84.

Полученные модели статистически значимы и могут быть использованы для точечного и интервального прогноза средней урожайности при различных значениях исследуемых факторов.

Интервальный прогноз позволяет с заданной наперед доверительной вероятностью получить интервал, в котором будет находиться значение фактора Y . Данный интервал определяется следующим образом:

$$\hat{Y}_p - t_\alpha \cdot \sigma \leq Y_p \leq \hat{Y}_p + t_\alpha \cdot \sigma,$$

где $\hat{Y}_p$ – точечное значение переменной Y , полученное подстановкой в уравнение регрессии прогнозного значения X_p ,

t_α – табличное значение критерия Стьюдента на уровне значимости α ,

σ – стандартная ошибка прогноза.

При этом стандартная ошибка прогноза определяется как

$$\sigma = s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_p - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}},$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}},$$

где $\bar{X}$ – среднее значение фактора X ,

X_p – прогнозное значение переменной X ,

s^2 – несмещенная оценка остаточной дисперсии.

Отдельный интерес представляет модель множественной регрессии зависимости средней урожайности зерновых культур от средних температур воздуха и среднего количества осадков в период их произрастания. Такая модель учитывает влияние на результатив Y каждого фактора X_1 , X_2 а так же их совместное влияние. Кроме того, в многофакторных моделях учтено взаимное влияние факторов, включенных в модель, друг на друга. Оценка качества множественной модели проводилась с учетом средней ошибки аппроксимации, индексов корреляции и детерминации, коэффициентов эластичности. Также проведен анализ влияния каждого фактора в отдельности и совокупного влияния факторов на урожайность и взаимодействие факторов, входящих в модель, между собой. Статистическая значимость модели и входящих в нее факторов оценена с применением критерия Фишера. Результаты расчетов модели множественной регрессии и корреляции отражены в таблице 3.

Таблица 3 – Уравнение множественной регрессии зависимости средней урожайности от средних температур воздуха и среднего количества осадков
и корреляционные характеристики

Уравнение множественной регрессии	$\hat{Y} = 46,982 - 0,841X_1 + 0,112X_2$		
Средняя ошибка аппроксимации $A, \%$	$A = 4,5 \%$		
Совокупный коэффициент корреляции, R	$R = 0,80$		
Частные коэффициенты корреляции:	r_{x_1y}	r_{x_2y}	$r_{x_1x_2}$
	0,69	0,77	0,62
Средние коэффициенты эластичности:	$\mathcal{E}_{x_1}$	$\mathcal{E}_{x_2}$	-
	0,35	0,46	-

Значения средней ошибки аппроксимации и совокупного

коэффициента корреляции говорят о хорошем подборе модели. Анализируя коэффициенты частной корреляции, можно сделать вывод, что фактор X_2 оказывает большее влияние на результатив Y , чем фактор X_1 . Значения средних коэффициентов эластичности также подтверждают вывод о более сильном влиянии на результатив Y фактора X_2 . Факторы X_1 и X_2 коррелируют между собой достаточно сильно, но в пределах допустимых значений.

Анализ критерием Фишера на уровне значимости 95 % также подтвердил статистическую значимость полученного уравнения регрессии и входящих в него факторов, поэтому полученная модель пригодна для дальнейшего использования при анализе и прогнозировании исследуемой величины (урожайности).

Выводы. При изучении влияния на исследуемую величину двух и более факторов могут использоваться как методы парной, так и методы множественной регрессии и корреляции. Полученные модели после проверки их статистической значимости и в случае приемлемой средней ошибки аппроксимации могут применяться при прогнозировании и анализе исследуемых величин. В данной работе получены: зависимость средней урожайности от средних температур воздуха в период произрастания $\hat{Y} = 571,062 - 52,479X_1 + 1,281X_1^2$ (средняя ошибка аппроксимации при этом равна 4,9%, коэффициент корреляции 0,77); зависимость средней урожайности от среднего количества осадков $\hat{Y} = 35,670 - 0,174X_2 + 0,0035X_2^2$ (средняя ошибка аппроксимации равна 3,9%, коэффициент корреляции 0,84). Так же получена модель множественной регрессии зависимости средней урожайности зерновых культур от средних температур воздуха и среднего количества осадков $\hat{Y} = 46,982 - 0,841X_1 + 0,112X_2$, характеризующая влияние на результатив Y каждого фактора X_1 , X_2 , а так же их совместное влияние (при этом

средняя ошибка аппроксимации равна 4,5%, коэффициент корреляции 0,80).

Полученные в данной работе модели, могут использоваться для точечного и интервального прогноза средней урожайности в зависимости от средних температур окружающего воздуха и среднего количества осадков в период произрастания зерновых культур. Данный подход может быть применен при исследовании, анализе и прогнозе различных зависимостей. В качестве факторов и результата могут быть выбраны любые интересующие исследователя величины.

Литература

1. Протасова, Н. А. Технологии предпосевной обработки семян озимой пшеницы / Н. А. Протасова // Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса : Сборник трудов по результатам II Международной научно-практической студенческой конференции-конкурса, Вологда-Молочное, 19 ноября 2019 года. – Вологда-Молочное: Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, 2019. – С. 152-155. – EDN FOJQPO.
2. Калина, И. А. Воздействие электроактивированной воды на посевной материал и вредителей / И. А. Калина, М. М. Украинцев // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. – 2017. – № 1. – С. 136-139. – EDN YPDSHH.
3. Протасова, Н. А. Влияние видимого излучения различных спектров на всхожесть и среднюю длину ростка озимой пшеницы / Н. А. Протасова, М. М. Украинцев, П. В. Гуляев // Активная честолубивая интеллектуальная молодёжь сельскому хозяйству. – 2019. – № 2(7). – С. 56-61. – EDN VKVJUC.
4. Методы множественной регрессии и корреляции в экономических исследованиях / Т. В. Жидченко, М. Н. Середина, В. В. Серегина, Н. М. Удинцова // Методология развития управления, экономики и образования. – Пенза : Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2023. – С. 130-153. – EDN KELCSW.
5. Низомов, С. С. Применение методов корреляционно-регрессионного и кластерного анализа при прогнозировании урожайности зерновых культур / С. С. Низомов // Гуманитарные и социальные науки. – 2014. – № 2. – С. 768-772. – EDN SGQPHR.
6. Коптева, Н. А. Использование прогностического аппарата при планировании сельскохозяйственных работ / Н. А. Коптева, Н. М. Удинцова // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 2. – С. 7-14. – EDN UUONLC.
7. Ширнаева, С. Ю. Статистический анализ устойчивости урожайности сельскохозяйственных культур / С. Ю. Ширнаева // Наука XXI века: актуальные направления развития. – 2022. – № 2-2. – С. 37-40. – DOI 10.46554/ScienceXXI-2022.10-2.2-pp.37. – EDN ILBTPG.
8. RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED EVALUATION OF THE WINTER BARLEY BREEDING IDENTIFIERS. Khlystunov V., Kopteva N.,

Filippov Ye., Udintsova N. В сборнике: E3S Web of Conferences. XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). EDP Sciences, 2023. С. 01050.

References

1. Protasova, N. A. Tehnologii predposevnoj obrabotki semjan ozimoy pshenicy / N. A. Protasova // Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa : Sbornik trudov po rezul'tatam II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy studencheskoj konferencii-konkursa, Vologda-Molochnoe, 19 nojabrja 2019 goda. – Vologda-Molochnoe: Vologodskaja gosudarstvennaja molochnohozjajstvennaja akademija im. N.V. Vereshhagina, 2019. – S. 152-155. – EDN FOJQPO.
2. Kalina, I. A. Vozdejstvie jelektroaktivirovannoj vody na posevnoj material i vreditel' / I. A. Kalina, M. M. Ukrainev // Molodaja nauka agrarnogo Dona: tradicii, opyt, innovacii. – 2017. – № 1. – S. 136-139. – EDN YPDSHH.
3. Protasova, N. A. Vlijanie vidimogo izlucheniya razlichnyh spektrov na vszhzhest' i srednjuju dlinu rostka ozimoy pshenicy / N. A. Protasova, M. M. Ukrainev, P. V. Guljaev // Aktivnaja chesoljubivaja intellektual'naja molodjzh' sel'skomu hozjajstvu. – 2019. – № 2(7). – S. 56-61. – EDN VKVJUC.
4. Metody mnozhestvennoj regressii i korrelyacii v jekonomicheskikh issledovaniyah / T. V. Zhidchenko, M. N. Seredina, V. V. Seregina, N. M. Udincova // Metodologija razvitiya upravlenija, jekonomiki i obrazovanija. – Penza : Avtonomnaja nekommercheskaja nauchno-obrazovatel'naja organizacija «Privolzhskij Dom znaniy», 2023. – S. 130-153. – EDN KELCSW.
5. Nizomov, S. S. Primenenie metodov korrelyacionno-regressionnogo i klasternogo analiza pri prognozirovanii urozhajnosti zernovyh kul'tur / S. S. Nizomov // Gumanitarnye i social'nye nauki. – 2014. – № 2. – S. 768-772. – EDN SGQPHR.
6. Kopteva, N. A. Ispol'zovanie prognosticheskogo apparata pri planirovanii sel'skohozjajstvennyh rabot / N. A. Kopteva, N. M. Udincova // Mezhdunarodnyj tehniko-jekonomicheskij zhurnal. – 2018. – № 2. – S. 7-14. – EDN UUONLC.
7. Shirnaeva, S. Ju. Statisticheskij analiz ustojchivosti urozhajnosti sel'skohozjajstvennyh kul'tur / S. Ju. Shirnaeva // Nauka XXI veka: aktual'nye napravlenija razvitiya. – 2022. – № 2-2. – S. 37-40. – DOI 10.46554/ScienceXXI-2022.10-2.2-pp.37. – EDN ILBTPG.
8. RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED EVALUATION OF THE WINTER BARLEY BREEDING IDENTIFIERS. Khlystunov V., Kopteva N., Filippov Ye., Udintsova N. V sbornike: E3S Web of Conferences. XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). EDP Sciences, 2023. S. 01050.