

АГРОНОМИЯ

Научная статья
УДК 633.1:519.24
DOI: 10.66783/2782-3172.2026.27.1.020

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КУЛЬТУР В РЕГИОНЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА (НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Наталья Егоровна Евдокимова

Всероссийский институт аграрных проблем и информатики им. А. А. Никонова, Москва, Россия
n.e.evdokimova@vniiesh.ru

Аннотация

В связи с изменением климата растениеводство в регионах сталкивается с постепенным изменением условий возделывания ранее районированных сортов и культур, а также с возрастающим воздействием экстремальных погодных явлений. В этих условиях актуальным научным направлением становится моделирование и прогнозирование продуктивности сельскохозяйственных культур от природно-климатических факторов их выращивания. В настоящей работе представлены методические аспекты построения регрессионной зависимости урожайности культур от таких факторов на основе данных по Кировской области. С использованием программного обеспечения Statistica10.0 получены математические модели для региональной урожайности яровой и озимой пшеницы, овса, озимой ржи и ярового ячменя. Метод, примененный для выбора факторов модели, отличается возможностью визуальной оценки выделенного воздействия каждого фактора на урожайность и применим для решения задач анализа и прогнозирования на исторических рядах региональных данных.

Ключевые слова: временной ряд данных, тренд, корреляционно-регрессионный анализ, Кировская область, яровая пшеница, озимая пшеница, овес, озимая рожь, яровой ячмень

Финансирование: исследование, на основе результатов которого написана данная статья, финансировалось за счет собственных средств автора

MATHEMATICAL MODELING OF REGIONAL CROP YIELD UNDER CLIMATE CHANGE (BASED ON DATA FROM THE KIROV REGION)

Natalya E. Evdokimova

All-Russian Institute of Agrarian Problems and Informatics named after A. A. Nikonov, Moscow, Russia
n.e.evdokimova@vniiesh.ru

Abstract

Due to climate change, crop production in the regions is facing gradual changes in the growing conditions of previously zoned varieties and crops, as well as the increasing impact of extreme weather events. Under these conditions, modeling and forecasting of crop productivity in response to natural and climatic factors has become the urgent research field. This paper presents methodological aspects of constructing a regression model for crop yields based on these factors, using the data of Kirov Region. Using Statistica10.0 software, mathematical models have been developed for regional

yields of spring and winter wheat, oats, winter rye, and spring barley. The method used to select model factors is characterized by visual assessment of the specific impact of each factor on yield, and it is applicable to solving problems of analysis and forecasting using historical regional data series.

Keywords: time series, trend, correlation and regression analysis, Kirov region, spring and winter wheat, oats, winter rye, spring barley

Funding: the study on which this article is based was funded by the authors' own funds

Введение. Отдел системного анализа экономических проблем АПК Всероссийского института аграрных проблем и информатики им. А.А. Никонова – филиала ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ, в котором работает автор, занимается выполнением работ по теме исследований «Разработать теоретико-методологические основы сценарного прогнозирования и планирования трансформации продовольственной системы России в режим устойчивого развития с учетом неопределенностей внешнего окружения и региональных особенностей». Одной из основных задач в рамках работы по этой тематике является сценарное моделирование и прогнозирование адаптации продовольственных систем к изменению климата. Различными аспектами моделирования влияния природно-климатических условий на растениеводство коллектив института занимается давно, с результатами исследований можно ознакомиться, например, в работах [1–3]. Идентификация функций урожайности сельскохозяйственных культур в регионе по климатическим параметрам – центральная задача, совершенствованием решения которой занимаемся не только мы в рамках нашей работы, но и многие современные исследователи. Такая настройка зависимости невозможна без обработки больших объемов исторических данных, а на практике исходный массив данных имеет больше факторов влияния и их комбинаций, чем число наблюдений. В этой работе представлена попытка преодоления таких сложностей при построении регрессионной зависимости.

Воздействие климатических параметров на продуктивность культурных растений эмпирически изучено довольно хорошо, однако количественное его представление сталкивается с рядом трудностей. Так, подробные биофизические модели роста растений требуют огромного количества исходной информации и, несмотря даже на наличие такой информации, не дают точных прогнозов, поскольку результат зависит, в том числе, от множества случайных факторов: экстремальных явлений, «человеческого» фактора и т. д.

Показатели урожайности в регионе зависят от трех агрегированных групп факторов:

- экономическая деятельность сельхозпроизводителей, в первую очередь – используемые технологии выращивания и организации производства (человеческий фактор), определяют тренд урожайности;
- климатические условия культивирования влияют на колебания урожайности;
- косвенные природные факторы (например, болезни растений, вредители, конкуренция сорняков и другие) усугубляют воздействие климата.

По оценкам, выполненным в работе [4], в настоящее время в развитых странах мира тренд, обусловленный организационно-технологическими улучшениями состояния аграрного сектора, составляет 80 % изменчивости урожайности, а остальные 20 % примерно поровну распределяются между погодой, вредителями и болезнями, которые опосредованно также зависят от климата [4]. По результатам расчетов, выполненных автором и опубликованных в книге [5], природно-климатическое влияние на урожайность зерновых различается по регионам России, и составляет более 20 %. Это обстоятельство также повышает актуальность исследований количественного воздействия на урожайность температурного и иных климатических факторов.

Корреляционно-регрессионный анализ применяется во всем мире для определения зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от климата. Для моделирования реакции региональной урожайности на большое количество коррелированных входных переменных используются разные виды регрессии:

- линейная (LR – Linear Regression);

- методом случайного леса (RFR – Random Forest Regression);
- LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator);
- методом опорных векторов (SVR – Support Vector Regression);
- методом К-ближайших соседей (KNN – K Nearest neighbor Regression);
- эластичная чистая регрессия (ENR – elastic net regression)
- и некоторые другие.

Перечисленные методы обработки данных входят в пакет прикладных программ *Statistical0.0*, который применялся для осуществления расчетов в рамках данного исследования. В некоторых источниках [4, 6] отмечено, что получаемые статистические зависимости влияния климатических параметров на урожайность весьма чувствительны к методам определения регрессии. Также исследователи указывают, что использование различных видов регрессионного анализа нередко приводит к различным выводам относительно влияния температуры и осадков. Основная же сложность, как это и было отмечено выше, состоит в том, что по причине большого количества переменных-кандидатов на влияние и их коррелированности друг с другом трудно выделить наиболее релевантные экзогенные переменные для включения в искомое уравнение.

Выборка параметров информации, использованной для моделирования, и его результатов из статей по прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур на региональном уровне с применением разных методов построения регрессий за последние несколько лет представлены в таблице 1.

Таблица 1. Метод построения регрессии, исходные данные, вошедшие в регрессию переменные и параметры оценки результатов моделирования урожайности сельскохозяйственных культур

Работа, метод, оценка	Использованные данные	Включенные переменные
[7] LR, $R^2 = 0,7$	Данные с сайта ФАО	Время, среднегодовое количество осадков, индексы цен на продовольствие, валовые сборы, площадь орошаемых земель
[8] KNN, $R^2 = 0,8$	Данные по рису и пшенице 4 штатов Индии	Валовые сборы, штат, сезон, урожайность
[9] LR, $R^2 = 0,8$	Данные за период с 2015 по 2018 год по провинции Шанлыурфа в Турции	Время и индексы: NDVI, SAVI, GNDVI и MSAVI
[10] KNN, $R^2 = 0,58$, ENR, $R^2 = 0,61$, LR, $R^2 = 0,62$, SVR, $R^2 = 0,64$	Данные по провинциям Канады: Остров Принца Эдуарда и Нью-Брансуик	Почвенные параметры и данные дистанционного зондирования
[11] RFR, $R^2 = 0,72$	Данные наблюдений с испытательного полигона в Колумбии, штат Миссури, США	Мультиспектральные и тепловые RGB-изображения с БПЛА, температура и осадки
[12] SVR, $R^2 = 0,7$	Данные полевых наблюдений, Австралия	Климатические данные, данные спутниковых снимков
[13] LASSO, $R^2 = 0,9$	Южный Китай, данные за 30 лет	Данные о производстве, данные об урожайности, NPK

Примечание: источники указаны в первом столбце таблицы.

По значениям R^2 в первом столбце таблицы 1 видна точность имитации исходных данных от 0,58 до 0,9 (то есть от 58 до 90 % достоверности). Конечно, коэффициент детерминации показывает только соответствие модели исходным данным. Качество и количество исторических временных рядов показателей также оказывает свое влияние на надежность полученных зависимостей. Следует отметить, что регрессионный анализ не делает получаемую с его помощью зависимость интерпретируемой.

Материалы и методы. Информационной базой исследования по зависимости урожайности основных сельскохозяйственных культур Кировской области (яровой и озимой пшеницы, овса, озимой ржи и ярового ячменя) от природно-климатических факторов послужили данные с сайтов: <https://rosstat.gov.ru/emiss>, <http://www.wdcb.ru/stp/solar/sunspots.ru.html>, <https://statbase.ru/> и <https://thermo.karelia.ru/weather/>. В распоряжении автора был также ряд значений за длительный временной период с 1947 по 2024 год по Кировской области:

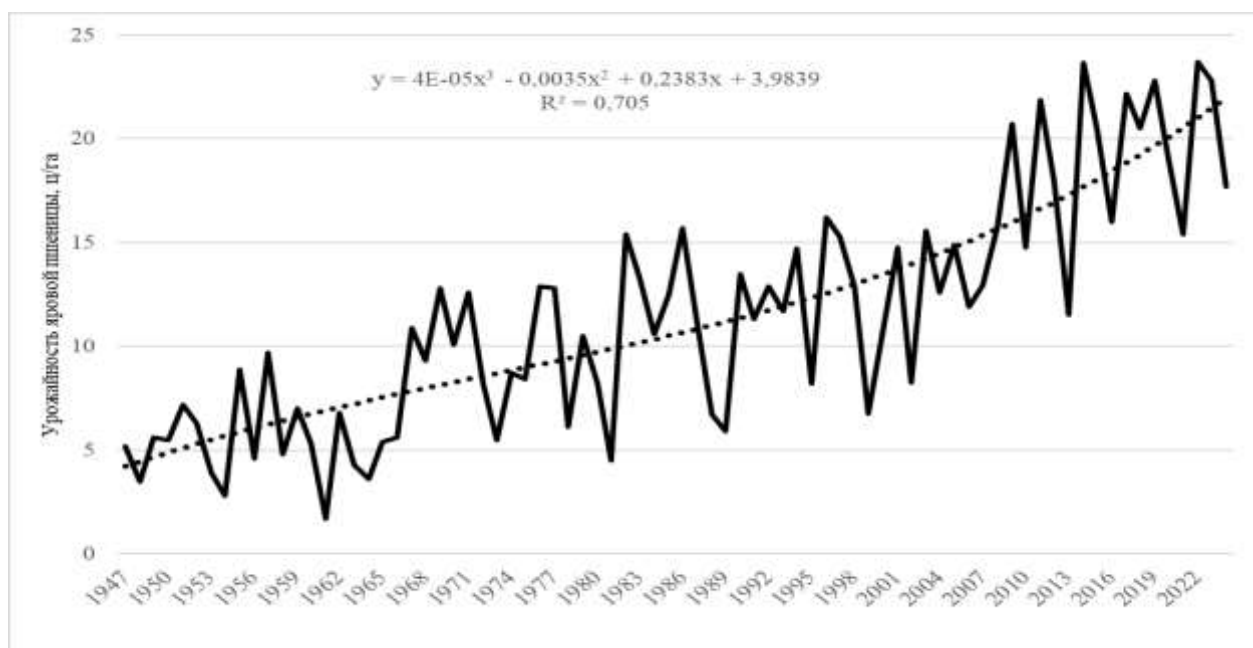
1. *Зависимая переменная:* урожайность яровой и озимой пшеницы, овса, озимой ржи и ярового ячменя, ц/га;

2. *Независимые переменные:*

- время (Т),
- показатель солнечной активности (числа Вольфа) с января по сентябрь (NW1-9),
- среднемесячная температура июля (Т_{mpI}),
- среднегодовое количество осадков, мм (RainG),
- среднегодовая температура воздуха (Т_{mpG}).

Ситуацию с выбором переменных для получения хорошо обоснованной статистической регрессионной зависимости усложняет то обстоятельство, что все перечисленные выше независимые переменные могут быть в нелинейной форме. Природно-климатические факторы оказывают влияние на отклонения от тренда урожайности, а непосредственно линия тренда определяется производственной деятельностью (технологический прогресс, интенсификация и увеличение объемов производства и т. п.). В связи с этим обстоятельством в итоговую выборку независимых переменных для регрессии нужно включать и время в нелинейном виде. Другой вариант производственной функции – это функция Кобба-Дугласа.

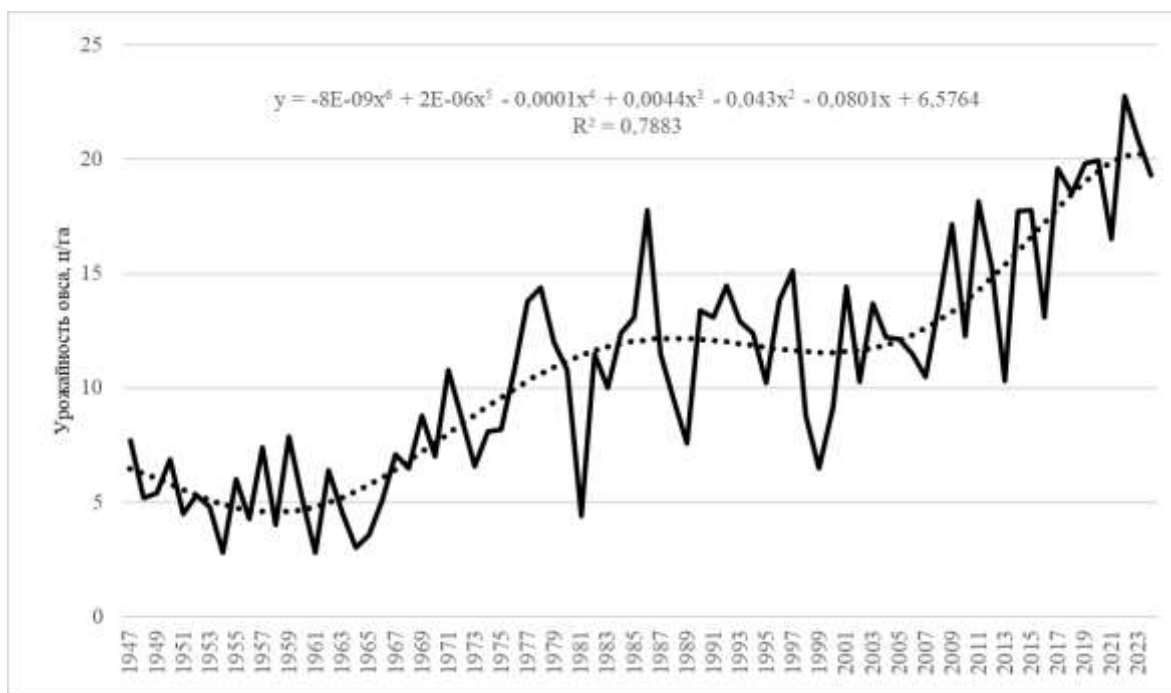
Многолетний тренд и исторический ряд данных наблюдений показателей урожайности в Кировской области представлен в виде графиков (рисунки 1 и 2). Следует отметить, что тренд выбирался тот, который дает наибольший прирост коэффициента детерминации при повышении степени полинома, однако дальнейшее усложнение уравнения тренда не приводит к существенному улучшению: коэффициент детерминации может увеличиваться, но незначительно.



Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 1. Многолетний тренд урожайности яровой пшеницы в Кировской области

В природно-климатических условиях Кировской области яровая пшеница (рисунок 1) существенно более чувствительна к условиям культивирования, чем овес (рисунок 2). Она требует больших вложений в плодородие почвы и точности агротехники, а овес является более неприхотливой культурой, лучше адаптированной к местным условиям. Именно это обстоятельство меняет направление тренда в 90-е годы прошлого века на спад урожайности у яровой пшеницы и практически не вызывает такой реакции у овса.



Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 2. Многолетний тренд урожайности овса в Кировской области

Более того, при идентификации регрессии необходимо понимание причин включения в итоговое уравнение факторов воздействия в том или ином виде. Здесь возможно следующее решение. Исторические данные можно воспринимать, как результаты некоего эксперимента, что даст возможность применить к ним методы обработки экспериментальных данных. Так, в самом простом случае это может быть усреднение значений зависимой переменной на единицу независимой. В данной работе они не будут рассматриваться, но есть и более сложные методы удаления «шума» для построения теоретической функциональной зависимости, если она, конечно, существует.

Усреднение значений зависимой переменной на единицу независимой дает возможность визуализировать после расчетов средних значений наличие и форму зависимости между зависимой и независимой переменными, которая существует в условиях абстрагирования от всех других факторов воздействия. После этого и, конечно, после статистических оценок степени воздействия можно отобрать меньшее количество независимых параметров и понять «отдельное» воздействие каждого фактора.

Представленный метод не отменяет оценки взаимосвязи переменных с помощью классического коэффициента корреляции, который определяет силу и направление линейной взаимосвязи (таблица 2).

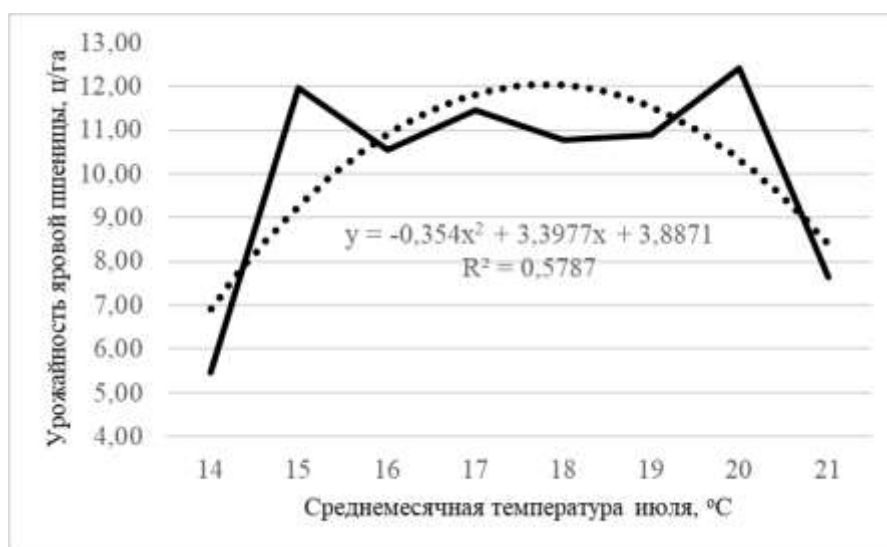
Все эти методы дополняют друг друга и необходимы для выбора переменных и формы функционального их воздействия на урожайность.

Таблица 2. Парные коэффициенты корреляции между зависимыми и независимыми переменными, рассчитанные в программе Statistica10.0

Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$. N = 78 (Построчное удаление ПД)												
Урожайность, ц/га	NW1	NW2	NW3	NW4	NW5	NW6	NW7	NW8	NW9	TmpI	RainGod	TmpGod
яровой пшеницы	-0,21	-0,20	-0,22	-0,27	-0,26	-0,24	-0,21	-0,26	-0,23	0,00	0,23	0,57
озимой пшеницы	-0,19	-0,21	-0,20	-0,23	-0,23	-0,23	-0,22	-0,23	-0,21	0,12	0,23	0,53
овса	-0,25	-0,26	-0,26	-0,34	-0,32	-0,30	-0,27	-0,31	-0,30	0,03	0,18	0,56
ржи озимой	-0,17	-0,19	-0,20	-0,24	-0,22	-0,22	-0,18	-0,21	-0,20	0,14	0,26	0,69
ячменя ярового	-0,18	-0,19	-0,19	-0,25	-0,24	-0,23	-0,20	-0,24	-0,22	0,00	0,22	0,57

Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics> и расчеты автора.

Результаты и обсуждение. На следующих графиках выведены средние значения урожайности на каждую единицу некоторых независимых переменных (рисунки 2 и 3).

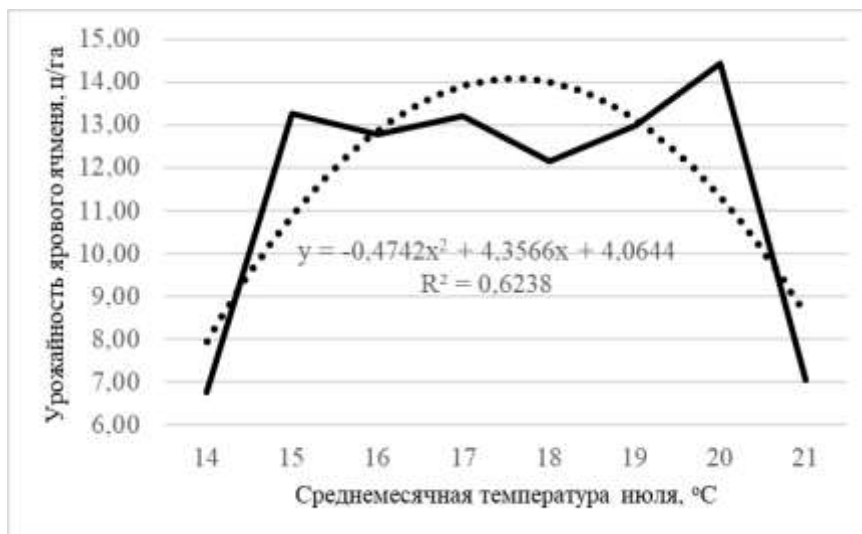


Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 3. Усредненные фактические значения урожайности яровой пшеницы на каждый градус изменения среднемесячной температуры июля и тренд их изменений при росте температуры

Так, на рисунке 3 представлены значения урожайности яровой пшеницы, усредненные на каждый градус изменения среднемесячной температуры июля (в градусах Цельсия): были рассчитаны средние значения урожайности этой культуры, полученной, например, при значениях средней температуры июля от 12,00 до 12,99 °C. Как видно на графике, диапазон средних июльских температур в Кировской области был в пределах от 12 до 22 °C в выбранный временной период. Воздействие среднемесячной температуры в июле на урожайность овса аналогично (рисунок 4).

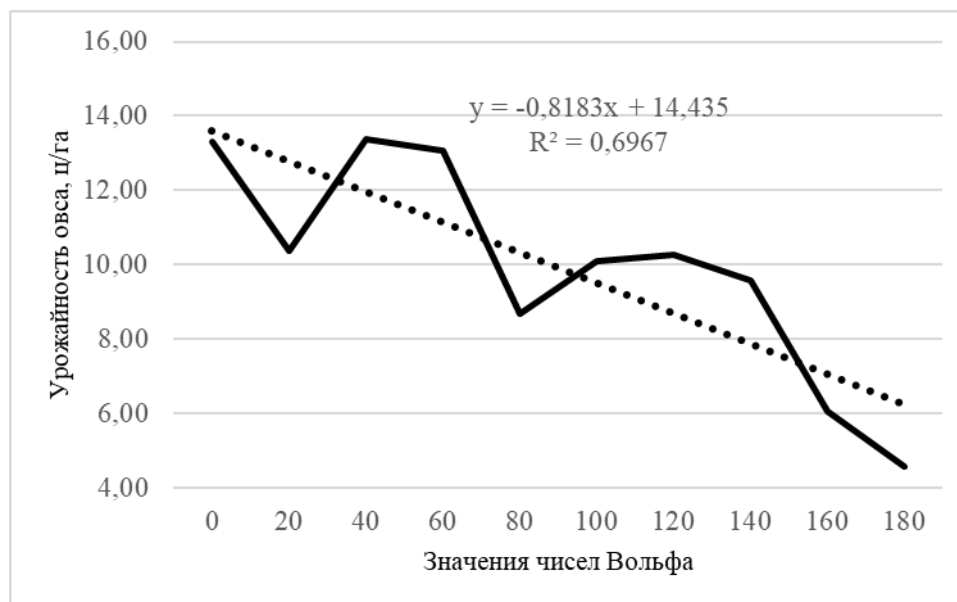
Нелинейность воздействия температурных погодных факторов на урожайность известна давно. Так, в работах [14, 15] с учетом данных многолетних наблюдений (1930–1962 гг.) было изучено влияние погоды на производство кукурузы и сои. Одним из предположений было нивелирование воздействия всех остальных факторов на урожайность, кроме средних температур в летние месяцы. Авторами [14, 15] теоретически доказано, что среднемесячные температуры за каждый летний месяц связаны с урожайностью кукурузы и сои нелинейным образом, а именно были обоснованы квадратичные уравнения, как и на рисунках 3 и 4.



Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 4. Усредненные фактические значения урожайности ярового ячменя на каждый градус изменения среднемесячной температуры июля и тренд их изменений при росте температуры

Данные таблицы 2 показывают, что солнечная активность в апреле NW4 влияет на урожайность всех выбранных культур. Однако, как можно видеть на рисунках 5 и 6, влияние апрельского значения чисел Вольфа, имеет другое влияние на урожайность, чем среднемесячные температуры июля. Так, с ростом солнечной активности при прочих равных условиях урожайность овса и озимой ржи падает.

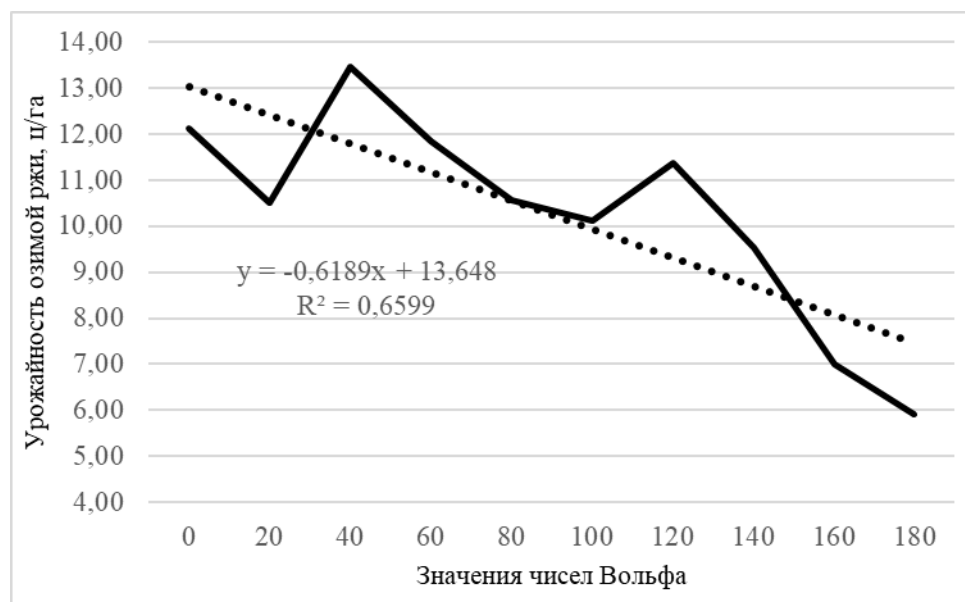


Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 5. Усредненные фактические значения урожайности овса на каждые 20 значений чисел Вольфа и тренд их изменений при росте солнечной активности

Автором были изучены различные варианты включения в искомые уравнения по каждой культуре природно-климатических параметров и временной переменной. Автор не может констатировать, что полученные регрессии не надо и нельзя улучшить. Во-первых, не рассмотрены вопросы, связанные с включением лаговых переменных, а гипотеза

отложенности климатического воздействия вполне может иметь место. Во-вторых, читатели не могут не отметить, что в данном исследовании не так много собственно климатических переменных. Автор просто использовал всю ему доступную информацию, а множество таких независимых переменных может быть расширено за счет суммы активных температур $t > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициента увлажнения почвы, агропотенциала, средних температур и осадков за все месяцы года, эвапотранспирации и других.



Источник: <https://fedstat.ru/> и <https://istmat.org/statistics>.

Рисунок 6. Усредненные фактические значения урожайности озимой ржи на каждые 20 значений чисел Вольфа и тренд их изменений при росте солнечной активности

В результате многовариантной работы с выбором переменных были получены следующие статистические параметры итоговых уравнений множественной регрессии (таблица 3).

Таблица 3. Итоги расчетов регрессионных уравнений урожайности в Statistica10.0

Итоги регрессии для зависимой переменной: Урожайность яровой пшеницы, ц/га R=0,869 R ² =0,755 Скоррект. R ² =0,748 F(2, 75) = 115,52 p < 0,0000 Стандартная ошибка (ст. ошибка): 2,4917						
	БЕТА	Ст. ошибка	B	Ст. ошибка	t (72)	p-знач.
Св. член			8,355855230	1,336713	6,25105	0,000000
T	0,8977	0,059060	0,196781357	0,012947	15,19935	0,000000
(TmpI) ²	-0,2356	0,059060	-0,015826097	0,003967	-3,98895	0,000153
Итоги регрессии для зависимой переменной: Урожайность озимой пшеницы, ц/га R=0,772 R ² =0,598 Скоррект. R ² =0,574 F(4, 72) = 26,626 p < 0,00000 Стандартная ошибка (ст. ошибка): 4,2353						
	БЕТА	Ст. ошибка	B	Ст. ошибка	t (72)	p-знач.
Св. член			11,35169920	3,64281	3,11620	0,002631
TmpG	-0,78160	0,374047	-0,06556638	0,03138	-2,08957	0,040190
(TmpG) ²	0,78010	0,389677	0,00013641	0,00007	2,00191	0,049062
T	0,52264	0,132994	0,15163707	0,03859	3,92982	0,000193
(TmpG) ² (-120d)*	0,26045	0,115531	0,00004700	0,00002	2,25436	0,027217

продолжение таблицы 3

Итоги регрессии для зависимой переменной: Урожайность овса, ц/га R=0,848 R ² =0,719 Скоррект. R ² =0,712 F(2, 75) = 96,159 p < 0,0000 Стандартная ошибка (ст. ошибка): 3,0227						
	БЕТА	Ст. ошибка	В	Ст. ошибка	t (75)	p-знач.
Св. член			9,03394948	1,22538	7,37234	0,000000
T ²	1,03793	0,100536	0,00316421	0,00031	10,32395	0,000000
(RainG)*(TmpG)	-0,25744	0,100536	-0,00000037	0,00000	-2,56068	0,012457
Итоги регрессии для зависимой переменной: Урожайность ржи озимой, ц/га R=0,840 R ² =0,705 Скоррект. R ² =0,689 F(4, 72) = 43,001 p < 0,0000 Стандартная ошибка (ст. ошибка): 2,7304						
	БЕТА	Ст. ошибка	В	Ст. ошибка	t (72)	p-знач.
Св. член			2,37974769	1,043743	2,28001	0,025570
NW1	0,429475	0,145452	0,03893747	0,013187	2,95268	0,004251
(RainG)*(TmpG)	0,401772	0,082387	0,00000049	0,000000	4,87667	0,000006
(TmpG) ² (-1200)*	0,469764	0,083335	0,00006390	0,000011	5,63704	0,000000
NW9 (-1200)*	-0,543153	0,145641	-0,04478247	0,012008	-3,72938	0,000380
Итоги регрессии для зависимой переменной: Урожайность ячменя ярового, ц/га R=0,850 R ² =0,722 Скоррект. R ² =0,715 F(2, 74) = 96,159 p < 0,0000 Стандартная ошибка (ст. ошибка): 2,9932						
	БЕТА	Ст. ошибка	В	Ст. ошибка	t (74)	p-знач.
Св. член			9,49456000	1,641555	5,78388	0,000000
T	0,872189	0,062911	0,21844607	0,015756	13,86393	0,000000
(TmpI) ²	-0,217805	0,062911	-0,01663010	0,004803	-3,46214	0,000894

Примечание: * лаговые переменные с запаздыванием на 1 год.

Как можно видеть, наиболее точные аппроксимации получены для урожайностей яровой пшеницы и озимой ржи, а наименее удовлетворительна зависимость для озимой пшеницы. При доступности большего количества исходных данных возможно существенное улучшение фактических и расчетных значений урожайности всех пяти исследуемых культур.

На рисунках 7 и 8 сопоставлены фактические и расчетные значения урожайностей озимой и яровой пшеницы, как наихудший и наилучший из полученных результатов по величине коэффициентов корреляции (см. соответствующие значения в таблице 3).

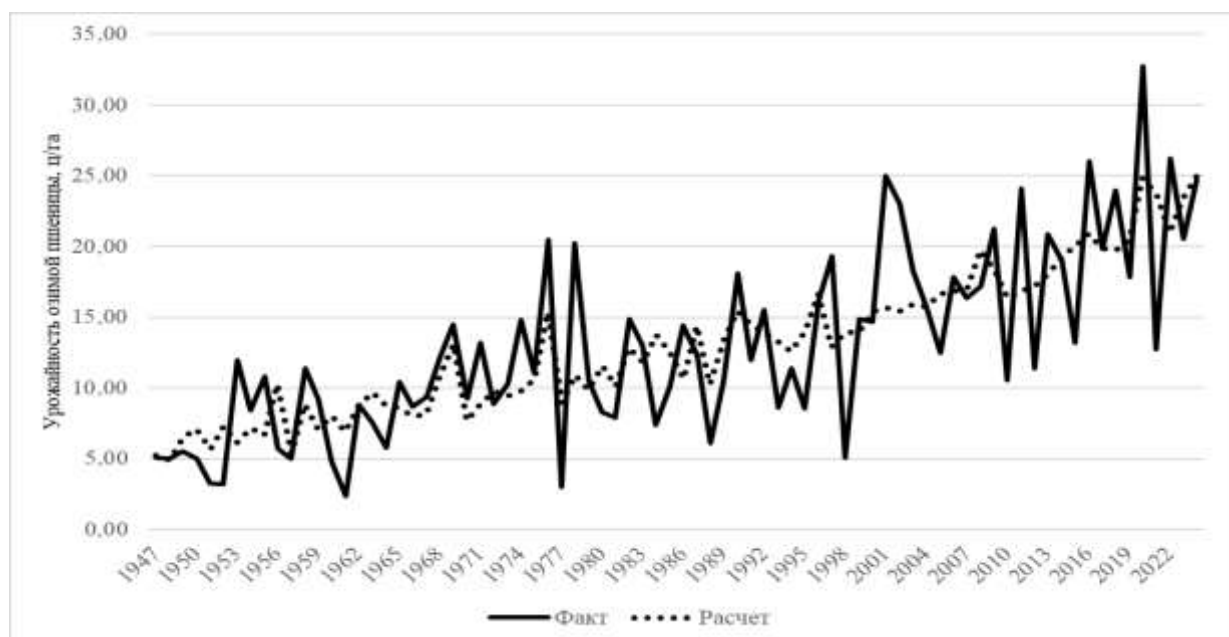


Рисунок 7. Фактические и расчетные значения урожайности озимой пшеницы

Несмотря на то, что результаты моделирования лучше по сравнению с предыдущими результатами моделирования [16–18], автор подчеркивает серьезную необходимость улучшения моделей путем включения в нее других природно-климатических параметров, влияющих на продуктивность культур.

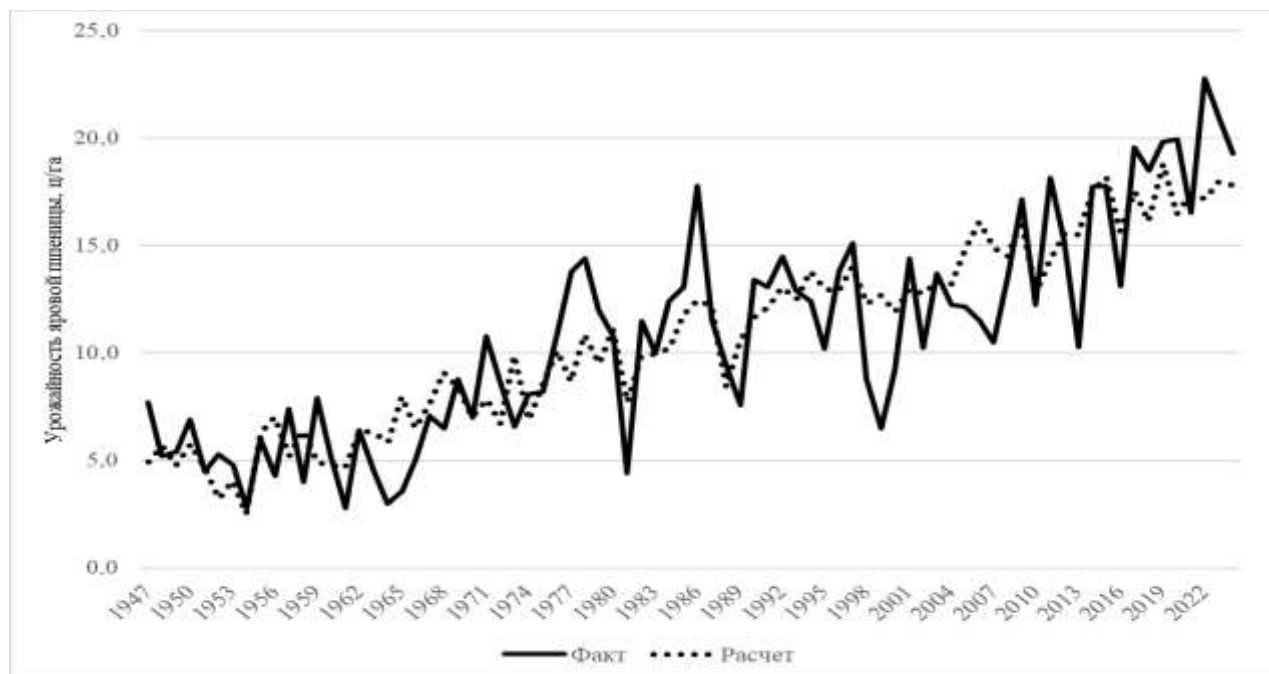


Рисунок 8. Фактические и расчетные значения урожайности яровой пшеницы

Закключение. В связи с изменением климата растениеводство сталкивается с постепенным изменением условий возделывания ранее районированных сортов и культур, а также с возрастающим воздействием экстремальных погодных явлений. Моделирование имеет важное значение для понимания сложных последствий этих изменений, а также для разработки стратегий адаптации, обеспечивающих продовольственную независимость региона в современных условиях нарастания геополитических и эпидемических угроз (таких как коронавирусная инфекция).

Целевым моментом моделирования и прогнозирования воздействия климата на сельскохозяйственные культуры является количественная оценка угроз снижения урожайности и разработка мер адаптации растениеводства к погодным характеристикам. Изменение климата нелинейно происходит в территориальном разрезе: даже в соседних регионах изменения могут происходить по-разному, периоды снижения температуры сменяются ее ростом, может резко возрасти число экстремальных погодных явлений, а характер выпадения осадков резко отклоняться от многовековых наблюдений. Моделирование эффективно при определении критических временных периодов, зон риска, оценки влияния на конкретные виды культур и разработки адаптивных стратегий (смена сроков сева, выбор устойчивых сортов или культур и т. п.).

Методология моделирования продуктивности культур от климатических параметров включает как процессное моделирование (биофизические и агрономические модели и их сочетание), так и статистическое моделирование (исторические корреляции) и теоретические модели полевых экспериментов. Статистическое моделирование на исторических данных наиболее часто применяется в региональных или территориальных моделях, что и послужило основой выбора метода в данной работе. Данные, полученные с помощью таких моделей, имеют решающее значение для планирования размещения сортов и культур, а также севооборотов. Климатически оптимизированное сельское хозяйство в настоящее время

научной общественностью пропагандируется как лучший метод адаптации к изменению климата. Для этого необходимо четкое понимание и математическое описание воздействия каждого из факторов на урожайность, а также их сочетаний, при этом полученные регрессии могут быть встроены в более сложные динамические модели [19] и применяться в прогнозировании более глобальных процессов.

Список источников

1. Галямин Е. П., Сиптиц С. О., Милютин Н. Н. Модель формирования урожая агроценоза и ее идентификация // Принципы управления продукционными процессами в агроэкосистемах. М., 1976. С. 96–115. EDN UAMRKZ.
2. Сиптиц С. О., Романенко И. А., Евдокимова Н. Е. Проектирование эффективных государственных регуляторов рынков агропродовольственной продукции // Актуальные проблемы современной аграрной теории и политики. М., 2005. С. 338–385. EDN TTRLXF.
3. Разработать теоретические основы формирования эффективного сельскохозяйственного производства на территории Российской Федерации с учетом биоклиматического потенциала региональных агропродовольственных систем : отчет о НИР / ВИАПИ им. А. А. Никонова ; И. А. Романенко, С. О. Сиптиц, О. С. Соболев [и др.]. М. : [б. и.], 2011. 201 с. EDN YRCSGR.
4. Gomme R. Crop-yield Weather Modelling. Lecture Notes and Exercises for WMO/FAO Roving Seminar. Rome : FAO, 2017. 155 p.
5. Влияние чрезвычайных ситуаций на продовольственную безопасность Российской Федерации / И. А. Романенко, С. О. Сиптиц, Н. Е. Евдокимова, О. Д. Егорова. М. : ЭРД, 2015. 142 с. EDN UWFCVT.
6. Comparison of regression techniques to predict response of oilseed rape yield to variation in climatic conditions in Denmark / Sharif B. [et al.] // European Journal of Agronomy. 2017. Vol. 82. P. 11–20.
7. Sellam V., Poovammal E. Prediction of crop yield using regression analysis // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9, no 38. P. 1–5.
8. Iniyan S., Varma V. A., Naidu C. T. Crop yield prediction using machine learning techniques // Advances in Engineering Software. 2023. Vol. 175. P. 103326.
9. Kaya Y., Polat N. A linear approach for wheat yield prediction by using different spectral vegetation indices // International Journal of Engineering and Geosciences. 2023. Vol. 8, no 1. P. 52–62.
10. Abbas F. et al. Crop yield prediction through proximal sensing and machine learning algorithms // Agronomy. 2020. Vol. 10, no 7. P. 1046.
11. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning / Maimaitijiang M. [et al.] // Remote sensing of environment. 2020. Vol. 237. P. 111599.
12. Kamir E., Waldner F., Hochman Z. Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 160. P. 124–135.
13. A comprehensive review of crop yield prediction using machine learning approaches with special emphasis on palm oil yield prediction / Rashid M. [et al.] // IEEE access. 2021. Vol. 9. P. 63406–63439.
14. Ezekiel M. Methods of Correlation Analysis. John Wiley & Sons, Inc. N. Y. 1941.
15. Thompson Louis M. Weather and technology in the production of corn and soybeans. CARD Reports. Book 17. 1963. URL: http://lib.dr.iastate.edu/card_reports/17 (дата обращения: 26.02.2026).
16. Мухамадьяров Ф. Ф., Пермякова Е. А. Изменчивость урожайности зерновых и зернобобовых культур в Кировской области // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 1 (65). С. 27–31. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-27-31. EDN RWRUAU.

17. Пермякова Е. А. Факторы и слагаемые изменчивости урожайности в Кировской области // Успехи современной науки. 2017. Т. 2, № 5. С. 182–185. EDN YTA YXJ.
18. Усова Г. А., Снигирева О. М. Урожайность зерновых культур в условиях Кировской области // Инновационные технологии – в практику сельского хозяйства : материалы ВНИК. Киров, 2019. С. 433–436. – EDN SWHFJG.
19. Сиптиц С. О. Критерии эффективности и устойчивости интеграционных образований и реализующие их процедуры // Никоновские чтения. 2006. № 11. С. 159–161. EDN NUWKUT.

References

1. Galyamin EP, Siptitz SO, Milyutin NN. Model' formirovaniya urozhaya agrotsenoza i yeye identifikatsiya = The model of crop formation of agroecosystem and its identification. In: Printsipy upravleniya produktsionnymi protsessami v agroekosistemakh = Principles of management of production processes in agroecosystems. Moscow: Nauka Publishing; 1976. P. 96–115. EDN UAMRKZ. (In Russ.).
2. Siptitz SO, Romanenko IA, Evdokimova NE. Proyektirovaniye effektivnykh gosudarstvennykh regulyatorov rynkov agroproduktov = Designing effective state regulators of agri-food markets. In: Aktual'n'yye problemy sovremennoy agrarnoy teorii i politiki = Actual problems of modern agrarian theory and policy. Moscow: VIAP named after A. A. Nikonov; 2005. P. 338–385. EDN TTRLXF. (In Russ.).
3. Romanenko IA, Siptitz SO, Sobolev OS, et al. Razrabotat' teoreticheskiye osnovy formirovaniya effektivnogo sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na territorii Rossiyskoy Federatsii s uchetom bioklimaticheskogo potentsiala regional'nykh agroproduktov: otchet o NIR / VIAP im. A.A. Nikonova = To develop the theoretical foundations for the formation of effective agricultural production in the Russian Federation, taking into account the bioclimatic potential of regional agri-food systems: a research report VIAP named after A.A. Nikonov. Moscow; 2011. 201 p. EDN YRCSGR. (In Russ.).
4. Gomme R. Crop-yield Weather Modelling. Lecture Notes and Exercises for WMO/FAO Roving Seminar. Rome: FAO; 2017. 155 p.
5. Romanenko IA, Siptitz SO, Evdokimova NE, Egorova OD. Vliyaniye chrezvychaynykh situatsiy na proizvodstvo bezopasnost' Rossiyskoy Federatsii = The impact of emergency situations on the food security of the Russian Federation. Moscow: ERD Publishing; 2015. 142 p. EDN UWFCVT. (In Russ.).
6. Sharif B, et al. Comparison of regression techniques to predict response of oilseed rape yield to variation in climatic conditions in Denmark. European Journal of Agronomy. 2017;(82):11–20.
7. Sellam V, Poovammal E. Prediction of crop yield using regression analysis. Indian Journal of Science and Technology. 2016;9(38):1–5.
8. Iniyan S, Varma VA, Naidu CT. Crop yield prediction using machine learning techniques. Advances in Engineering Software. 2023;175:103326.
9. Kaya Y, Polat N. A linear approach for wheat yield prediction by using different spectral vegetation indices. International Journal of Engineering and Geosciences. 2023;8(1):52–62.
10. Abbas F, et al. Crop yield prediction through proximal sensing and machine learning algorithms. Agronomy. 2020;10(7):1046.
11. Maimaitijiang M, et al. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. Remote sensing of environment. 2020;237:111599.
12. Kamir E, Waldner F, Hochman Z. Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020;160:124–135.
13. Rashid M, et al. A comprehensive review of crop yield prediction using machine learning approaches with special emphasis on palm oil yield prediction. IEEE access. 2021;9:63406–63439.
14. Ezekiel M. Methods of Correlation Analysis. New York John Wiley and sons Publishing; 1941.

15. Thompson Louis M. Weather and technology in the production of corn and soybeans. CARD Reports. Book 17. 1963. URL: http://lib.dr.iastate.edu/card_reports/17. [Accessed 26 February 2026].
16. Mukhamadyarov FF, Permyakova EA. Variability of grain and leguminous crop yields in the Kirov region. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022;17(1): 27–31. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-27-31. EDN RWRUAU. (In Russ.).
17. Permyakova EA. Factors and components of yield variability in the Kirov region. Uspekhi sovremennoy nauki. 2017;2(5):182–185. EDN YTAYXJ. (In Russ.).
18. Usova GA, Snigireva OM. Urozhaynost' zernovykh kul'tur v usloviyakh Kirovskoy oblasti = Grain productivity in the conditions of the Kirov region // In: Innovatsionnyye tekhnologii – v praktiku sel'skogo khozyaystva: materialy VNPK = Innovative technologies – in the practice of agriculture: materials of the VNPK. Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2019. P. 433–436. EDN SWHFJG. (In Russ.).
19. Siptitz S. O. Criteria for the effectiveness and sustainability of integration entities and the procedures implementing them. Nikonovskiye chteniya. 2006;(11):159–161. EDN NUWKUT. (In Russ.).

Информация об авторе

Евдокимова Наталья Егоровна, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Всероссийский институт аграрных проблем и информатики имени А. А. Никонова», Большой Харитоньевский пер., д. 21, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 107078
e-mail: n.e.evdokimova@vniiesh.ru

Information about the author

Natalya E. Evdokimova, candidate of economics sciences, leading researcher of All-Russian Institute of Agrarian Problems and Informatics named after A. A. Nikonov, 21 Bolshoy Kharitonyevsky Lane, building 1, Moscow, 107078, Russian Federation
e-mail: n.e.evdokimova@vniiesh.ru

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: the author declared that there was no conflict of interest

Статья / The article

поступила в редакцию / was submitted	04.03.2026
одобрена после рецензирования / approved after reviewing	25.03.2026
принята к публикации / accepted for publication	27.03.2026