

Научная статья/Research Article

УДК 519.23+519.246:519.85:633

DOI: 10.36718/1819-4036-2024-12-66-77

Ярослав Михайлович Ивань¹, Софья Андреевна Петрова²

¹Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, пос. Молодежный, Иркутская область, Россия

¹iy mex@rambler.ru

²sofia.registration@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ДИНАМИКИ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Цель исследования – разработка алгоритма моделирования урожайности сельскохозяйственной культуры на основе динамико-стохастических и циклических свойств многолетних рядов характеристики. Задачи: выделение свойств временных рядов биопродуктивности сельскохозяйственных культур на основе их рассмотрения в виде многоуровневых структур с циклическими колебаниями; использование свойств изменчивости многолетних рядов характеристики для построения моделей прогнозирования или стохастической оценки; реализация алгоритма моделирования на примере урожайности зерновых и зернобобовых культур России и биопродуктивности пшеницы в США. Объект исследования – многолетняя изменчивость урожайности сельскохозяйственной культуры. Создан алгоритм построения динамико-стохастической многоуровневой модели для прогнозирования изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур в разных условиях сочетания состояния природной среды и технологических процессов с учетом циклических колебаний характеристики. Алгоритм реализован для моделирования эмпирических рядов. При описании многолетней изменчивости характеристики и оценки благоприятных и неблагоприятных событий использованы тренды, гистограммы распределения относительных частот циклов локальных минимумов и максимумов и вероятностные распределения потерь и прироста урожайности. Многоуровневое моделирование позволяет оценивать динамику биопродуктивности сельскохозяйственных культур в разных условиях деятельности товаропроизводителей: определять потери в неблагоприятных условиях природно-технологической среды, выявлять прирост урожайности в благоприятных ситуациях. С помощью стохастических методов предложено оценивать редкие события, соответствующие очень высокой и очень низкой урожайности сельскохозяйственных культур, а также переходы уровней ряда в события. На основе выделенных многоуровневых трендов и частоты циклов локальных экстремумов получен ретроспективный прогноз характеристики с упреждением 3 года.

Ключевые слова: урожайность, сельскохозяйственная культура, многоуровневая структура ряда, алгоритм, тренд, вероятность, прогноз

Для цитирования: Ивань Я.М., Петрова С.А. Моделирование многоуровневой динамики урожайности сельскохозяйственных культур // Вестник КрасГАУ. 2024. № 12. С. 66–77. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-12-66-77.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (соглашение № 24-21-00502).

Yaroslav Mikhailovich Ivano¹, Sofya Andreevna Petrova²

¹Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny settlement, Irkutsk Region, Russia

¹iy mex@rambler.ru

²sofia.registration@mail.ru

MODELING MULTILEVEL DYNAMICS OF AGRICULTURAL CROPS YIELD

The objective of the study is to develop an algorithm for modeling crop yields based on the dynamic-stochastic and cyclical properties of long-term characteristic series. Tasks: identifying the properties of time series of agricultural crop bioproductivity based on their consideration as multi-level structures with cyclical fluctuations; using the properties of variability of long-term characteristic series to build forecasting or stochastic assessment models; implementing the modeling algorithm using the example of grain and leguminous crop yields in Russia and wheat bioproductivity in the USA. The object of the study is long-term variability of agricultural crop yields. An algorithm for constructing a dynamic-stochastic multilevel model for forecasting the variability of agricultural crop yields under different conditions of a combination of the state of the natural environment and technological processes, taking into account cyclical fluctuations of the characteristic, has been created. The algorithm has been implemented for modeling empirical series. When describing the long-term variability of the characteristic and assessing favorable and unfavorable events, trends, histograms of the distribution of relative frequencies of local minimum and maximum cycles, and probability distributions of yield losses and gains have been used. Multilevel modeling allows assessing the dynamics of agricultural crop bioproductivity under different conditions of producers' activities: determining losses in unfavorable conditions of the natural and technological environment, identifying yield gains in favorable situations. Using stochastic methods, it is proposed to estimate rare events corresponding to very high and very low crop yields, as well as transitions of series levels into events. Based on the identified multi-level trends and the frequency of local extreme cycles, a retrospective forecast of the characteristic with a lead time of 3 years is obtained.

Keywords: yield, agricultural crop, multi-level structure of the series, algorithm, trend, probability, forecast

For citation: Ivano Ya.M., Petrova S.A. Modeling multilevel dynamics of agricultural crops yield // Bulliten KrasSAU. 2024;(12): 66–77 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-12-66-77.

Acknowledgments: the work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (agreement № 24-21-00502).

Введение. Урожайность сельскохозяйственных культур является значимой характеристикой. Ее особенности изменчивости по тенденции и диапазону колебаний позволяют идентифицировать условия производственных и природно-климатических процессов, в которых осуществляется деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей [1–3]. С помощью этой характеристики прямо или косвенно определяется эффективность работы хозяйства [4], агротехнических приемов [5], систем защиты сельскохозяйственных культур [6] и других факторов. Многолетние временные ряды биопродуктивности обладают динамико-стохастическими свойствами – тенденция роста во времени и непредсказуемые колебания уровней, которые можно описать с помощью статистических методов обработки данных.

Исследования урожайности зерновых культур, овощей, картофеля и кормовых культур для различных хозяйств, муниципальных образований, агроландшафтных районов в Иркутской области показывают сходную многолетнюю изменчивость рассматриваемой характеристики. При этом волнообразные колебания урожайнос-

ти с тенденцией роста наблюдаются не только для указанного региона с резко континентальным климатом [4], но и для других территорий и стран с разными физико-географическими условиями [7].

При выявлении закономерностей изменчивости временного ряда, в том числе урожайности сельскохозяйственных культур, ряд можно рассматривать как некоторую неделимую последовательность с равнозначными уровнями. Такое описание ряда является классическим и используется для построения моделей динамики с оценкой некоторого вероятного интервала колебания характеристики, зависящего от стандартного отклонения, t -статистики Стьюдента, с заданием уровня значимости. Для примера приведем довольно популярный источник литературы с таким подходом для построения трендов, автокорреляционных зависимостей и факторных моделей [8].

В отличие от такого способа анализа временного ряда в работе [9] ряды некоторых гидрометеорологических характеристик рассматриваются в виде иерархических структур. В этом случае предлагается из исходных рядов выде-

лять локальные минимумы и максимумы для формирования последовательностей этих уровней. Поскольку средние годовые температуры воздуха и годовые расходы воды рек, как правило, представляют собой случайные величины, авторы работы [9] не рассматривали возможность выделения значимых трендов на разных уровнях иерархии временных рядов этих величин. Между тем многие характеристики, связанные с получением сельскохозяйственной продукции, обладают устойчивыми тенденциями. К ним, прежде всего, относится урожайность разных сельскохозяйственных культур за многолетний период, полученная для хозяйства, муниципального района, региона и страны. Такую характеристику предлагается исследовать на предмет выявления динамико-стохастических свойств не только исходного ряда, но и локальных экстремумов, характеризующих благоприятную и неблагоприятную тенденции роста или падения. Для урожайности сельскохозяйственной культуры тенденция роста локальных максимумов описывает благоприятную ситуацию получения урожая, а тенденция изменчивости локальных минимумов – неблагоприятные условия результатов деятельности товаропроизводителя. При этом тренд для всех уровней ряда характеризует усредненную ситуацию роста урожайности [9]. Очевидно, что разности между уровнями трендов всего ряда и последовательности локальных минимумов представляют собой усредненные потери урожайности, а разности между уровнями трендов локальных максимумов и всего ряда характеризуют прирост продукции.

Между тем при иерархическом анализе временного ряда для моделирования урожайности необходимо учитывать очередность проявления усредненных, благоприятных и неблагоприятных тенденций [10]. В частности, при упреждении один шаг результатом прогнозирования может быть одно из трех значений – высокий, низкий уровень или промежуточный уровень. Такой подход к моделированию характеристики биопродуктивности повышает адекватность математической модели, поскольку значения временного ряда являются оригинальными. Исключения из этого правила наблюдаются довольно редко. Другими словами, числа многолетнего ряда, как правило, не повторяются. Вместе с тем возникает проблема, связанная с оценкой продолжительности циклов, как локальных ми-

нимумов, так и локальных максимумов, которая может колебаться в относительно широком диапазоне.

Особыми свойствами обладают значения ряда, выходящие за пределы трендов низких и высоких урожайностей, названные событиями. Они подчиняются стохастическим закономерностям и связаны с проявлениями природных стихий или очень благоприятных сочетаний природно-климатических факторов и технологических условий получения урожая. Среди событий выделяются те из них, которые соответствуют наибольшим и наименьшим разностям эмпирических и модельных значений трендов локальных экстремумов, названные редкими. При этом в случае отсутствия многоуровневых трендов и описания последовательностей всего ряда, локальных минимумов и максимумов в виде случайных выборок определяется интервал часто встречающихся значений (диапазон между средними уровнями локальных минимумов и максимумов) и реже повторяющихся событий (уровни выше среднего локальных максимумов и ниже локальных минимумов). Для оценки событий используется закон распределения вероятностей исходного ряда биопродуктивности сельскохозяйственной культуры.

Цель исследования – разработка алгоритма моделирования урожайности сельскохозяйственной культуры на основе динамико-стохастических и циклических свойств многолетних рядов характеристики.

Задачи: выделение свойств временных рядов биопродуктивности сельскохозяйственных культур на основе их рассмотрения в виде многоуровневых структур с циклическим колебаниями; использование свойств изменчивости многолетних рядов характеристики для построения моделей прогнозирования или стохастической оценки; реализация алгоритма моделирования на примере урожайности зерновых культур с большими объемами исходных данных.

Объекты и методы. В качестве объекта исследования рассматриваются многолетние ряды урожайности сельскохозяйственных культур. В качестве примера реализации алгоритма использованы ряды биопродуктивности пшеницы в США по данным за 1866–2023 гг. [7, 11], зерновых и зернобобовых культур в России (1896–2023 гг.) [7]. Статистическая обработка данных выполнена с помощью приложения MS Excel и разработанного одним из авторов программного

комплекса «Многоуровневое прогнозирование показателей аграрного производства».

Для оценки закономерностей изменчивости временных рядов характеристики применены следующие методы: определение локальных экстремумов ряда, выделение многоуровневых трендов; оценка статистических параметров многоуровневой выборки, подбор вероятностного распределения, построение гистограммы циклов, прогнозирование.

Результаты и их обсуждение. Ряды биопродуктивности обладают динамико-стохастическими свойствами. С одной стороны уровни имеют тенденцию к возрастанию, а с другой – они подвержены непредсказуемым колебаниям (рис. 1). Тенденция роста вызвана развитием технологий и созданием новых сортов. Колебания уровней ряда обусловлены погодными и климатическими условиями с формированием экстремальных событий – засух, метеорологических и гидрологических явлений, а также вредителей сельскохозяйственных растений [12].

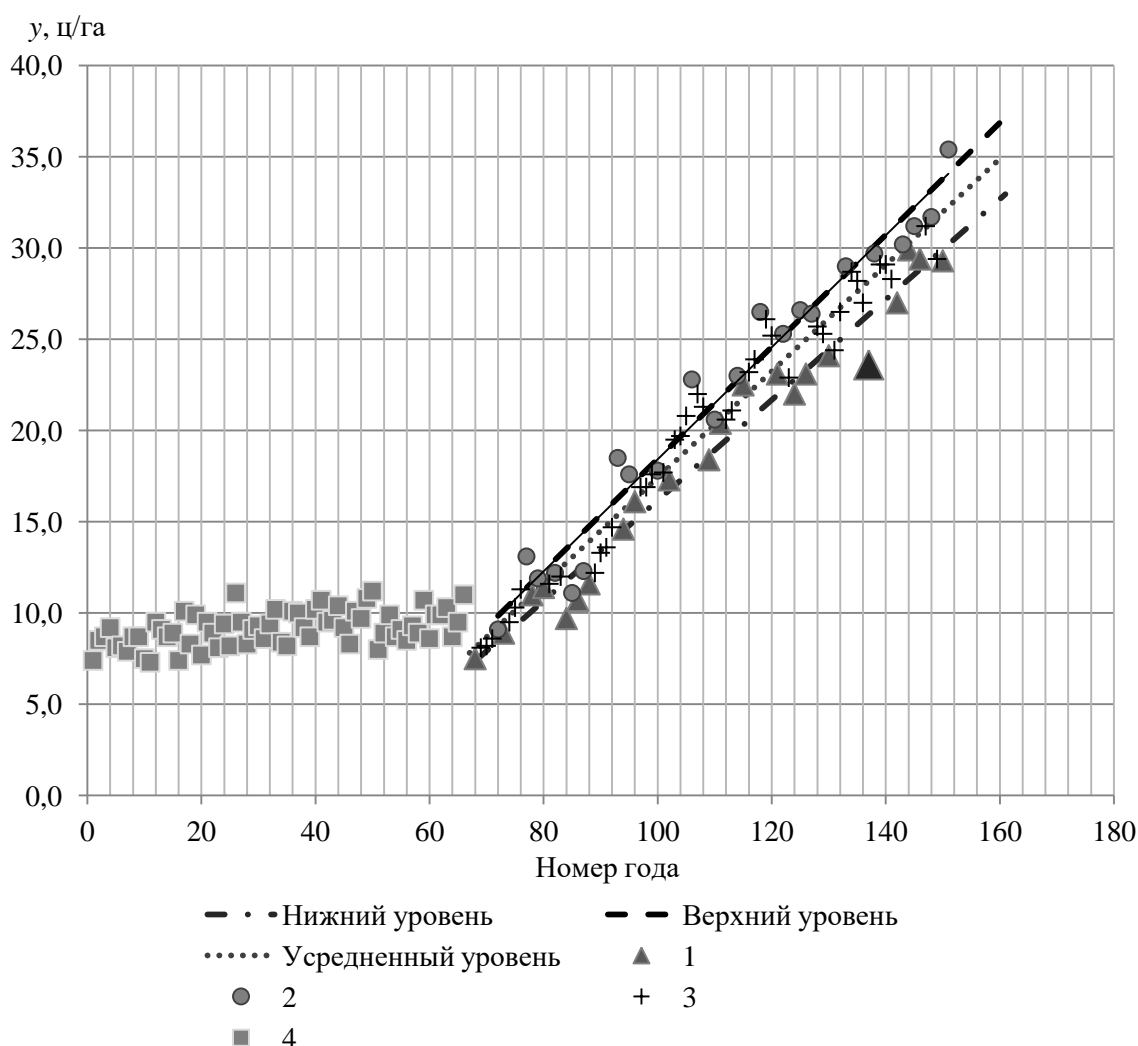


Рис. 1. Динамика урожайности пшеницы в США с линейными трендами локальных минимумов (1, нижний уровень), локальных максимумов (2, верхний уровень), уровней всего ряда (1–3, усредненный уровень) за 1932–2016 гг. и данными 1866–1931 гг. (4)

На рисунке 1 показаны тенденции и колебания значений относительно трендов. На предварительном этапе определялся начальный год эпохи устойчивой тенденции роста для урожайности пшеницы в США. Здесь использована оценка точности линейного тренда с помощью

динамики коэффициента детерминации $R^2(t)$ и анализа локальных минимумов. На основе последовательного включения данных с шагом один год, завершение старой тенденции и переход к новой для построения многоуровневых трендов датируется 1931–1932 гг.

В этот период отмечается тенденция падения значения $R^2(t)$. При этом в 1933 г. зарегистрирован локальный минимум, близкий к абсолютному минимуму. Таким образом, в качестве исходной точки принят 1932 г. По аналогичной схеме выделено начало устойчивой тенденции роста для ряда урожайности зерновых и зернобобовых в России – 1942 год.

Согласно [13], при наличии значимых регрессионных уравнений и их значимых коэффициентов для всего ряда, локальных минимумов и максимумов определяются тенденции роста урожайности в усредненных, благоприятных и неблагоприятных условиях. При этом разности уровней регрессионных уравнений, описывающих последовательности локальных минимумов, и уровней тренда всего ряда, характеризуют отрицательные усредненные потери. Между тем разности уровней трендов локальных максимумов и уровней регрессионного уравнения всего ряда представляют собой усредненный прирост урожайности. Значения, располагающиеся ниже линии уравнения регрессии локальных минимумов, и выше тренда локальных максимумов относятся к неблагоприятным и

благоприятным событиям, которые подчиняются законам распределения вероятностей.

На рисунке 1 большим треугольником выделено значение ряда, соответствующее наибольшему отклонению от трендов всего ряда и последовательности локальных минимумов.

В таблице 1 приведены многоуровневые тренды урожайности зерновых и зернобобовых культур в России в виде экспоненты и пшеницы в США с использованием линейной и степенной функции. Символы y_t и t характеризуют урожайность сельскохозяйственных культур и время (номер года). В таблице 1 приведены также расчетные параметры регрессионных уравнений: значимость уравнений α для F -критерия Фишера, значимость коэффициента уравнения в соответствии с t -статистикой Стьюдента, относительная средняя δ и максимальная δ_{max} погрешности аппроксимации. Эти статистические параметры определялись для исходного ряда и локальных экстремумов, поскольку каждая из трех последовательностей обладает своими особенностями.

Таблица 1

Тренды урожайности зерновых культур в России и США со статистической оценкой их точности

Уравнение регрессии	R^2	F -критерий Фишера	α	t -статистики Стьюдента	δ , %	δ_{max} , %
Россия, зерновые и зернобобовые культуры, 1942–2023 гг.						
Все уровни ряда						
$y_t = 6,55e^{0,0174t}$	0,82	367,5	$1,92 \cdot 10^{-31}$	19,2	15,2	88,2
Локальные минимумы						
$y_t = 6,02e^{0,0174t}$	0,81	109,7	$8,05 \cdot 10^{-11}$	10,5	15,7	72,4
Локальные максимумы						
$y_t = 7,56e^{0,0171t}$	0,91	260,2	$7,74 \cdot 10^{-15}$	16,3	9,4	32,6
США, пшеница, 1932–2023 гг.						
Все уровни ряда						
$y_t = -11,7 + 0,291t$	0,95	1679,5	$7,56 \cdot 10^{-57}$	41,0	6,5	31,6
$y_t = 0,00762t^{1,684}$	0,95	1571,8	$1,04 \cdot 10^{-55}$	39,6	7,3	27,8
Локальные минимумы						
$y_t = -11,3 + 0,275t$	0,97	683,8	$6,13 \cdot 10^{-17}$	26,1	5,8	21,3
$y_t = 0,00561t^{1,721}$	0,96	545,7	$5,46 \cdot 10^{-16}$	23,4	6,6	18,6
Локальные максимумы						
$y_t = -12,2 + 0,307t$	0,97	586,9	$2,7 \cdot 10^{-16}$	24,2	6,3	24,5
$y_t = 0,00762t^{1,684}$	0,95	365,6	$2,55 \cdot 10^{-14}$	19,1	6,8	21,7

Приведенные многоуровневые модели являются значимыми. Однако точность трендов урожайности пшеницы в США выше, чем точность аппроксимации ряда биопродуктивности зерновых и зернобобовых культур в России с помощью экспоненты, что следует из значений R^2 , δ и δ_{max} . При этом, согласно расчетным параметрам, линейная зависимость лучше степенной для урожайности пшеницы в США.

Многоуровневые тренды позволяют определять диапазон наиболее вероятных колебаний временного ряда, оценивать вероятности перехода уровня в благоприятные p_k^{max} и неблагоприятные p_k^{min} события [4, 13] и рассчитывать вероятности редких неблагоприятных p^{min} и благоприятных p^{max} событий. Для решения таких задач формируются ряды разностей между фактическими данными (Ф) и уровнями трендов локальных минимумов (НУ) и максимумов (ВУ). Экстремальные значения рядов этих разностей обозначены $-\Delta u$ и $+\Delta u$. На рисунке 2 для примера показаны распределения разностей Ф-НУ и Ф-ВУ, характеризующих потери (а) и прирост (б) урожайности зерновых и зернобобовых культур в России с использованием закона Пирсона III типа [14].

Применение закона распределения Пирсона III типа обусловлено следующими его свойствами: 1) случайная величина может принимать, как положительные, так и отрицательные значения в интервале от минус до плюс бесконечности; 2) функция является асимметричной с положительным и отрицательным коэффициентом асимметрии. Частным случаем этого распределения является, например, нормальный закон.

По отрицательным значениям Ф-НУ (рис. 2, а) определяются неблагоприятные события, а по положительным разностям Ф-ВУ (рис. 2, б) – бла-

гоприятные события. Точки же пересечения оси ординат в первом и во втором случаях являются вероятностями перехода локальных минимумов и максимумов в события,

На основе выполненных операций в таблице 2 приведены следующие статистические параметры: число неблагоприятных k^{min} и благоприятных событий k^{max} ; экстремальные потери $-\Delta u$ и прирост $+\Delta u$ урожайности зерновых культур в определенные годы; наименьшие y_{min} и наибольшие y_{max} урожайности и годы их проявления; вероятности наибольших потерь p^{min} и наибольшего прироста биопродуктивности p^{max} ; вероятности перехода локальных минимумов p_k^{min} и максимумов p_k^{max} в события.

Поскольку в таблице 2 приведены результаты для благоприятных и неблагоприятных событий в наименовании полей использовано двойное обозначение, например k^{max} (k^{min}), что означает размещение информации по двум характеристикам.

Согласно полученным данным в России, значительно чаще проявляют себя события. При этом редкие потери в нашей стране намного выше, а редкий прирост урожайности в значительно ниже показателя потерь. Для США редкие потери и редкий прирост биопродуктивности пшеницы являются близкими по модулю величинами. По данным таблицы 2 линейный тренд лучше описывает ряд урожайности пшеницы в США по сравнению со степенной функцией с точки зрения вероятностей переходов локальных минимумов и максимумов в события и наибольших потерь. На основе полученных результатов можно заключить, что ряд урожайности пшеницы в США изменяется более предсказуемо по сравнению с рядом биопродуктивности зерновых и зернобобовых культур в России.

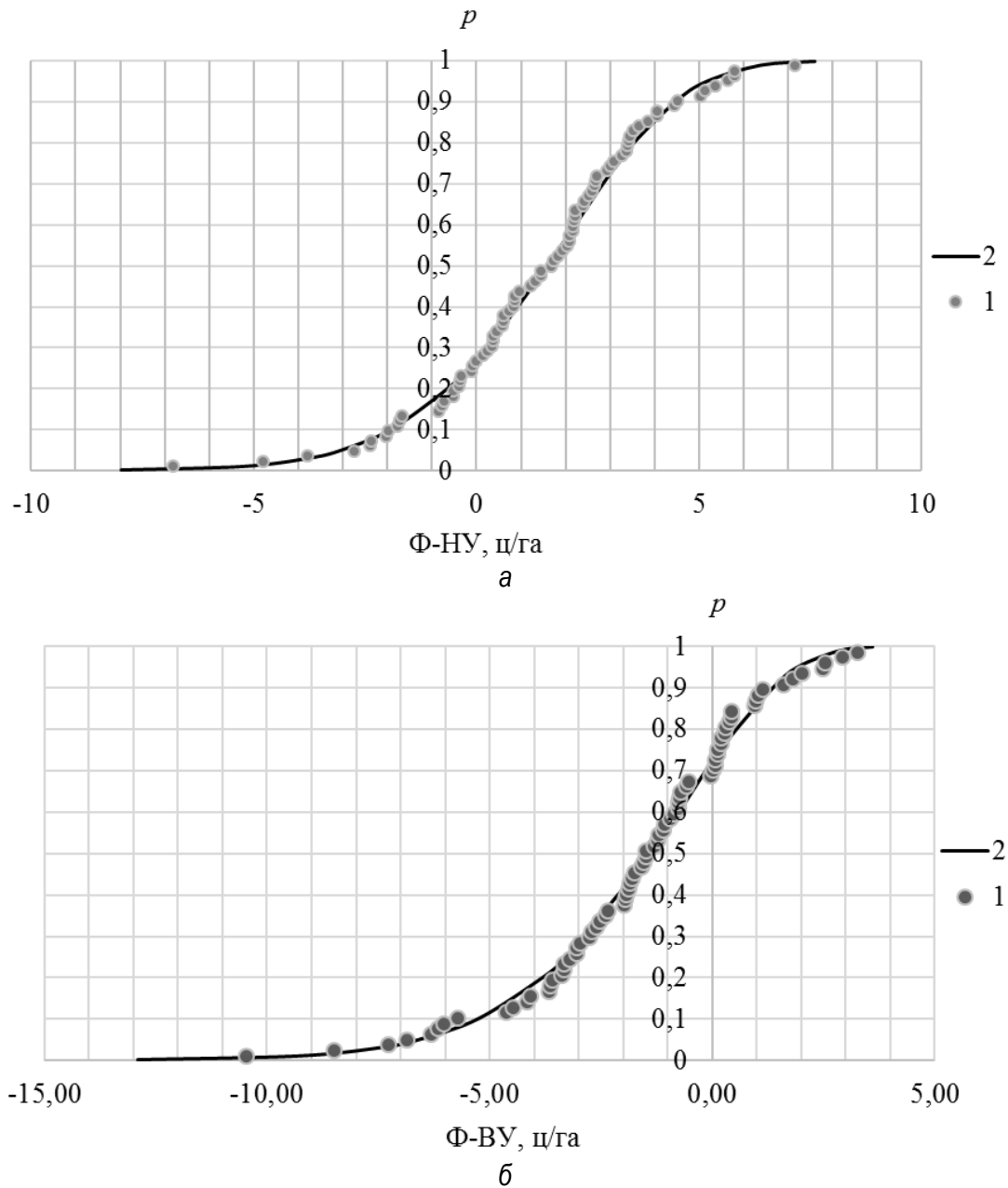


Рис. 2. Распределение Пирсона III типа (2), характеризующее потери (а) и прирост (б) урожайности зерновых и зернобобовых культур в России, построенные по эмпирическим данным (1) за 1932–2016 гг.

Таблица 2

Вероятностная оценка событий урожайности зерновых культур в России и США

Уровни ряда	Число событий $k_{max} (k_{min})$	$-\Delta y (+\Delta y)$ ц/га	Год	y_{min} (y_{max})	Год	p^{min} (p^{max})	p_k^{min} (p_k^{max})
1	2	3	4	5	6	7	8
Россия, зерновые и зернобобовые культуры, 1942–2023 гг.							
Локальные минимумы (экспонента)	22	-6,8	1998	4,2	1943	0,00482	0,271
Локальные максимумы (экспонента)	23	3,3	1973	33,6	2022	0,00505	0,278

1	2	3	4	5	6	7	8
США, пшеница, 1932–2023 гг.							
Локальные минимумы (линейный тренд)	17	-2,8	2002	7,5	1933	0,00515	0,200
Локальные максимумы (линейный тренд)	20	2,5	1983	35,4	2016	0,00910	0,245
Локальные минимумы (степенной тренд)	17	-3,0	2002	7,5	1933	0,00481	0,202
Локальные максимумы (степенной тренд)	23	3,2	1971	35,4	2016	0,00737	0,301

Между тем выделение из временного ряда локальных минимумов и максимумов предполагает моделирование циклов между экстремальными точками. На рисунке 3 для примера по данным урожайности зерновых и зернобобовых культур в России показаны гистограммы относительных частот (m/n) циклов между локальными минимумами (а) и максимумами (б), где m – число повторяемости конкретного цикла, а n – общее количество циклов.

В первом случае наиболее часто встречается трехлетний и двухлетний циклы с относительными частотами 0,429 и 0,381. Другими словами, в 81 случае из 100 проявляется цикл 2 или 3. Примерно так же проявляют себя двухлетние и трехлетние циклы между максимумами (78 случаев из 100). Редким для временного ряда урожайности зерновых и зернобобовых считается семилетний цикл. Поэтому при моделировании будущих ситуаций нужно ориентироваться на циклы продолжительностью от 2 до 5 лет.

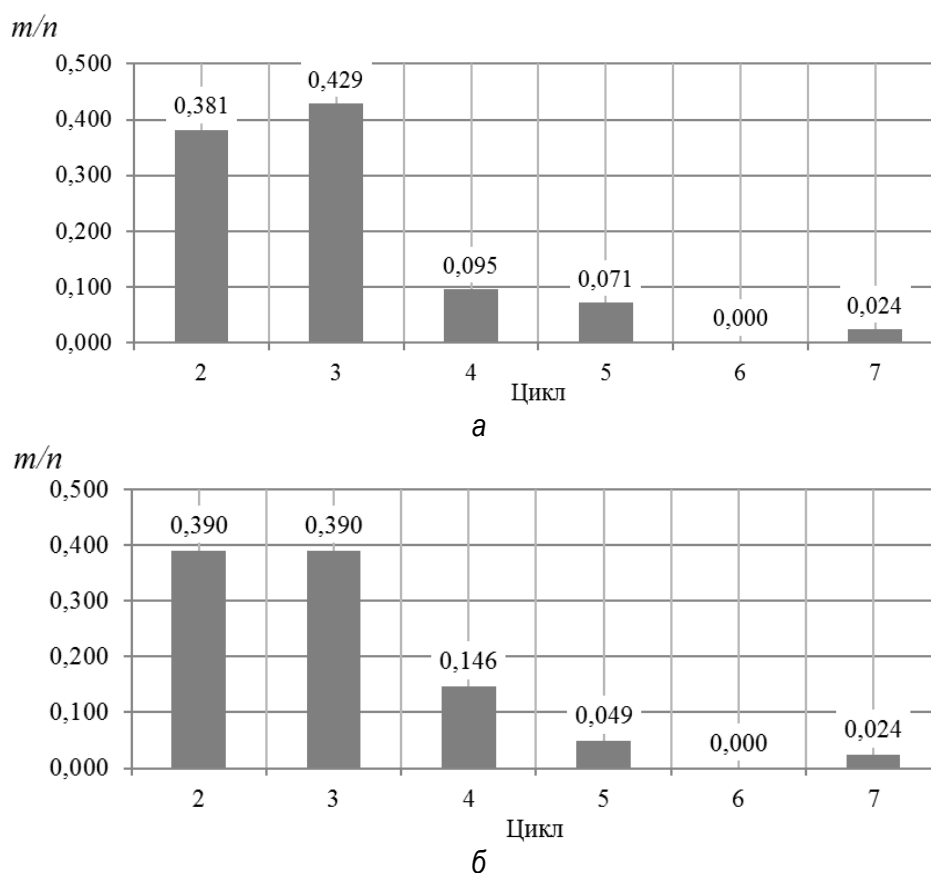


Рис. 3. Гистограммы распределения циклов между локальными минимумами (а) максимумами (б) урожайности зерновых и зернобобовых культур в России, построенные по эмпирическим данным за 1896–2017 гг.

В отличие от приведенных гистограмм для урожайности пшеницы в США они характеризуются большей частотой проявления циклов 5–7 лет. Для минимумов значения m/n для них составляют 0,182, а для максимумов – 0,209. Эти значения примерно в 2–3 раза больше по сравнению с аналогичными показателями для России. Повторяемость более продолжительных циклов в конкретном случае характеризует более высокую стабильность роста урожайности рассматриваемых культур.

Применим приведенный алгоритм многоуровневого моделирования с учетом циклических колебаний урожайности сельскохозяйственных культур для ретроспективного прогноза на основе данных для России за период 1942–2023 гг., а для США – 1932–2023 гг. (табл. 3). Прогноз на 2018–2020 гг. для первого случая осуществлялся по данным 1942–2017 гг. Во втором случае для прогнозирования на три года использованы значения урожайности пшеницы за 1932–2016 гг.

Алгоритм прогнозирования сводится к следующему.

Во-первых, определяется принадлежность конечных уровней ряда к иерархической структуре (минимум или максимум или промежуточное значение). В конкретном случае для ряда урожайности пшеницы в США локальный минимум наблюдался в 2015 г., а локальный максимум – в 2016 г. Поэтому прогноз на 2017 и 2019 гг. осу-

ществлялся по трендам локальных минимумов и максимумов. Для получения прогноза в 2018 г. использовался тренд всего ряда.

Что касается урожайности зерновых и зернобобовых культур в России, то здесь локальный минимум и максимум наблюдались в 2015 и 2017 гг. С учетом наиболее вероятного цикла p_c локальный минимум спрогнозирован для 2018, а максимум – для 2020 г. Промежуточное значение 2019 г. получено по тренду всего ряда.

Относительная погрешность прогноза для урожайности пшеницы в США, согласно линейному тренду, является наименьшей, находясь в пределах 2,7 %. В дополнение к этому степенная функция уступает в точности линейной зависимости. Точность прогноза биопродуктивности зерновых и зернобобовых культур в России ниже. Особенно это касается прогноза локального минимума, хотя он действительно проявил себя в отмеченном году.

Недостатком приведенного алгоритма прогнозирования и вероятностной оценки потерь и прироста являются ограничения, связанные с объемом необходимой информации о рядах сельскохозяйственных культур и статистической устойчивостью многоуровневых трендов. Сложность так же заключается в предсказании продолжительности цикла. При этом предполагается ежегодное возобновление данных для уточнения прогнозов.

Таблица 3

Ретроспективный прогноз урожайности зерновых культур для России и США на период 2017–2020 гг.

Тренд	Уровень ряда	Год	Фактическое значение	Прогноз	δ , %	Цикл, год	p_c
Россия, зерновые и зернобобовые культуры, 1942–2020 гг.							
Экспонента	Нижний	2018	25,4	21,8	14,2	3	0,429
	Средний	2019	26,7	25,0	6,4		
	Верхний	2020	28,6	28,8	0,7	3	0,390
США, пшеница, 1932–2019 гг.							
Линейный	Нижний	2017	31,2	30,5	2,3	2	0,386
	Средний	2018	32,0	32,9	2,7		
	Верхний	2019	34,7	35,0	2,7	3	0,349
Степенной	Нижний	2017	31,2	31,9	2,4	2	0,386
	Средний	2018	32,0	34,8	8,8		
	Верхний	2019	34,7	36,7	8,8	3	0,349

В особую группу определены благоприятные и неблагоприятные события, которые описываются с помощью вероятностного распределения. В приведенных примерах вероятности рисков проявления неблагоприятных событий для России составляют не более 0,271 (см. табл. 2). Другими словами, чаще одного раза в 4 года могут наблюдаться урожайности зерновых и зернобобовых культур ниже значений тренда локальных минимумов. Для США аналогичный показатель составил значение не более 0,200, т. е. повторяемость плохих ситуаций соответствует одному разу в 5 лет.

Из событий выделим те из них, которые соответствуют максимальному приросту урожайности и наибольшим потерям и обладают очень низкими вероятностями (редкие события). Для урожайности зерновых и зернобобовых культур в России вероятность редкого неблагоприятного события несколько меньше чем для биопродуктивности пшеницы в США (см. табл. 2). Однако вероятность редкого благоприятного события по данным рассматриваемой урожайности в России значительно ниже по сравнению с аналогичной характеристикой США. Очевидно, что подобные урожайности обычно в будущем не повторяются, поэтому редкие потери или прирост для заданной вероятности могут быть определены с помощью построенных вероятностных распределений Пирсона III типа. Следует иметь в виду, что вероятностное распределение, как и многоуровневые тренды, обладают определенной точностью, что необходимо учитывать при использовании предложенного алгоритма.

Заключение. Разработанный алгоритм моделирования урожайности сельскохозяйственных культур отражает случай наличия во временном ряду значимых многоуровневых трендов для прогнозирования характеристики с учетом циклических колебаний при усредненных, благоприятных и неблагоприятных природно-технологических условиях.

Рекомендованы способы вероятностной оценки редких потерь и прироста урожайности сельскохозяйственных культур, а также перехода уровней ряда в благоприятные и неблагоприятные события.

Получен ретроспективный прогноз урожайности пшеницы в США и зерновых и зернобобовых культур в России на среднесрочную перспективу, что позволило оценить возможности

комплексной оценки динамики характеристики биопродуктивности.

Гистограммы повторяемости циклов локальных минимумов и максимумов могут быть использованы как типовые с уточнением особенностей регионов России.

Список источников

1. *Никитина В.И., Количенко А.А.* Урожайность среднеспелых сортов яровой мягкой пшеницы в различных природно-климатических зонах Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7. С. 40–47. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-40-477.
2. *Иванько Я.М., Столопова Ю.В.* Климатическая изменчивость и агрометеорологические условия Предбайкалья: экспериментальные исследования и моделирование урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 117–124.
3. Оценка агроклиматических ресурсов и урожайности яровой пшеницы в Республике Татарстан / *В.Н. Павлова* [и др.] // Метеорология и гидрология. 2023. № 1 (январь). С. 90–102.
4. Оптимизация производства сельскохозяйственной продукции при сочетании орошаемых и неорошаемых земель / *Я.М. Иванько* [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 5. С. 48–54.
5. Влияние агротехнических приемов на продуктивность озимой пшеницы в условиях Центрально-Черноземного региона / *И.И. Гуреев* [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 9. С. 36–41.
6. *Родимцев С.А., Павловская Н.Е.* Сравнительная оценка новых систем защиты и прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных NDVI // Вестник КрасГАУ. 2023. № 1. С. 69–79. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79.
7. Динамика урожайности сельскохозяйственных культур. Межстрановые сравнения. URL: https://pikabu.ru/story/dinamika_urozhaynosti_selskokhozyaystvennyikh_kultur_mezhstranovyye_sravneniya_6673988 (дата обращения: 27.10.2024).
8. *Гармаш А.Н., Орлов И.В., Федосеев В.В.* Экономико-математические методы и при-

- кладные модели: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2022. 328 с.
9. Дружинин И.П., Смага В.Р., Шевнин А.Н. Динамика многолетних колебаний речного стока. М.: Наука, 1991. 176 с.
 10. Петрова С.А., Иваньо Я.М. О циклических колебаниях агроклиматических характеристик // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. п. Молодежный, 2023. С. 540–546.
 11. Соединенные Штаты Америки: урожай зерновых с гектара. URL: https://ru.theglobaleconomy.com/USA/cereal_yield (дата обращения: 27.10.2024).
 12. ФАО. 2024. Воздействие бедствий на сельское хозяйство и продовольственную безопасность – 2023. Предотвращение и сокращение потерь за счет инвестиций в повышение невосприимчивости к внешним воздействиям. Рим, ФАО. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6179a69c-92a6-49e4-9fe6-429f68d42a55/content> (дата обращения: 27.10.2024).
 13. Иваньо Я.М., Петрова С.А. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков // Актуальные вопросы аграрной науки. 2022. № 42. С. 48–57. URL: <http://agronauka-irsau.ru> (дата обращения: 29.10.2024)
 14. Карпов И.Г., Грибов А.Н. Модернизация распределений Пирсона для аппроксимации двухсторонних законов распределения экспериментальных данных // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 2. С. 5–10.
 - zernovykh kul'tur // Meteorologiya i gidrologiya. 2019. № 10. S. 117–124.
 3. Ocenka agroklimaticheskikh resursov i urozhajnosti yarovoj pshenicy v Respublike Tatarstan / V.N. Pavlova [i dr.] // Meteorologiya i gidrologiya. 2023. № 1 (yanvar'). S. 90–102.
 4. Optimizaciya proizvodstva sel'skohozyajstvennoj produkcii pri sochetanii oroshaemyh i neoroshaemyh zemel' / Ya.M. Ivan'o [i dr.] // Dostizheniya nauki i tehniki APK. 2024. T. 38. № 5. S. 48–54.
 5. Vliyanie agrotehnicheskikh priemov na produktivnost' ozimoj pshenicy v usloviyah Central'no-Chernozemnogo regiona / I.I. Gureev [i dr.] // Dostizheniya nauki i tehniki APK. 2024. T. 38, № 9. S. 36–41.
 6. Rodimcev S.A., Pavlovskaya N.E. Sravnitel'naya ocenka novyh sistem zaschity i prognozirovaniya urozhajnosti zernovykh kul'tur na osnove dannyh NDVI // Vestnik KrasGAU. 2023. № 1. S. 69–79. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79.
 7. Dinamika urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur. Mezhsranovye sravneniya. URL: https://pikabu.ru/story/dinamika_urozhajnosti_selskokhozyaystvennyikh_kultur_mezhsranovye_sravneniya_6673988 (data obrascheniya: 27.10.2024).
 8. Garmash A.N., Orlov I.V., Fedoseev V.V. `Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli: uchebnik. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Yurajt, 2022. 328 s.
 9. Druzhinin I.P., Smaga V.R., Shevnin A.N. Dinamika mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka. M.: Nauka, 1991. 176 s.
 10. Petrova S.A., Ivan'o Ya.M. O ciklicheskih kolebaniyah agroklimaticheskikh harakteristik // Nauchnye issledovaniya i razrabotki k vnedreniyu v APK: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh. p. Molodezhnyj, 2023. S. 540–546.
 11. Soedinennye Shtaty Ameriki: urozhaj zernovykh s gektara. URL: https://ru.theglobaleconomy.com/USA/cereal_yield (data obrascheniya: 27.10.2024).
 12. FAO. 2024. Vozdejstvie bedstvij na sel'skoe hozyajstvo i prodovol'stvennyuyu bezopasnost' – 2023. Predotvraschenie i sokraschenie poter' za schet investicij v povyshenie nevospriimchivosti k vneshnim vozdejstviyam. Rim,

References

1. Nikitina V.I., Kolichenko A.A. Urozhajnost' srednespelykh sortov yarovoj myagkoj pshenicy v razlichnykh prirodno-klimaticheskikh zonah Krasnoyarskogo kraja // Vestnik KrasGAU. 2024. № 7. S. 40–47. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-40-477.
2. Ivan'o Ya.M., Stolopova Yu.V. Klimaticheskaya izmenchivost' i agrometeorologicheskie usloviya Predbajkal'ya: `eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie urozhajnosti

- FAO. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6179a69c-92a6-49e4-9fe6-429f68d42a55/content> (data obrascheniya: 27.10.2024).
13. *Ivan'o Ya.M., Petrova S.A.* Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nyh urovnej vremennogo ryada dlya ocenki riskov // Aktual'nye voprosy agrornoj nauki. 2022. № 42. S. 48–57. URL: <http://agronauka-irsau.ru> (data obrascheniya: 29.10.2024)
14. *Karpov I.G., Gribov A.N.* Modernizaciya raspredelenij Pirsona dlya approksimacii dvuhstoronnih zakonov raspredeleniya `eksperimental'nyh dannyh // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2014. T. 324. № 2. S. 5–10.

Статья принята к публикации 04.12.2024 / The article accepted for publication 04.12.2024.

Информация об авторах:

Ярослав Михайлович Иванов¹, профессор кафедры информатики и математического моделирования, проректор по цифровой трансформации, доктор технических наук, профессор
Софья Андреевна Петрова², доцент кафедры информатики и математического моделирования, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Yaroslav Mikhailovich Ivano¹, Professor at the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Vice-Rector for Digital Transformation, Doctor of Technical Sciences, Professor
Sofya Andreevna Petrova², Associate Professor at the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Candidate of Technical Sciences, Docent

