

Г. А. Камышенко

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: kamyshenka@tut.by*

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В РАСЧЕТЕ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ

Аннотация. Представлены результаты статистической оценки влияния изменяющихся погодно-климатических условий территории Беларуси на продуктивность картофеля с целью построения расчетной модели урожайности культуры. Исследование выполнено за период с 1960 по 2019 г. Расчеты произведены относительно климатической составляющей в качестве предиктора с учетом отклонений температуры воздуха и атмосферных осадков от многолетних климатических норм месяцев, оказывающих наиболее значимое влияние на урожайность культуры. Построена адекватная малопараметрическая модель изменчивости урожайности картофеля, возделываемого в Беларуси. Результаты исследования актуальны для решения прогнозных задач.

Ключевые слова: урожайность, картофель, температура воздуха и атмосферные осадки, статистические методы, расчет продуктивности

H. A. Kamyshenka

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: kamyshenka@tut.by*

CLIMATIC COMPONENT IN THE CALCULATION POTATO YIELDS

Abstract. The results of the statistical assessment of the influence of the changing weather-climatic conditions of the territory of Belarus on the productivity of potatoes in order to build a settlement model of yields are presented. The study was completed from 1960 to 2019. Calculations are made relative to the climatic component as a predictor, taking into account the deviations of the air temperature and atmospheric precipitation from the long-term climate norms of the months that have the most significant impact on the yield of culture. The adequate model of variability of the yield of potatoes, cultivated in Belarus, is constructed. The research results are relevant for solving forecasting problems.

Keywords: yield, potato, air temperature and precipitation, statistical methods, calculation of productivity

Г. А. Камышэнка

*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
Мінск, Беларусь, e-mail: kamyshenka@tut.by*

КЛИМАТИЧНАЯ САСТАЎНАЯ ЧАСТКА Ў РАЗЛІКУ ЎРАДЖАЙНАСЦІ БУЛЬБЫ

Анотацыя. Прадстаўлены вынікі статыстычнай ацэнкі ўплыву зменлівых пагодна-кліматычных умоў тэрыторыі Беларусі на прадуктыўнасць бульбы з мэтай пабудовы разліковай мадэлі ўраджайнасці. Даследаванне выканана за перыяд з 1960 па 2019 г. Разлікі выраблены адносна кліматычнай састаўнай часткі ў якасці прэдыктара з улікам адхіленняў тэмпературы паветра і атмасферных ападкаў ад шматгадовых кліматычных норм месяцаў, якія аказваюць найбольш значны ўплыў на ўраджайнасць культуры. Пабудавана адекватная мадэль зменлівасці ўраджайнасці бульбы, вырошчываемай у Беларусі. Вынікі даследавання актуальныя для вырашэння прагнозных задач.

Ключавыя словы: ўраджайнасць, бульба, тэмпература паветра і атмасферныя ападкі, статыстычныя метады, разлік прадуктыўнасці

Введение. Изменяющиеся агроклиматические ресурсы территории оказывают значительное влияние на растениеводство. Основные потери в сельском хозяйстве связаны с воздействием опасных явлений погоды, таких как засухи, заморозки, сильные ливни, град и т. д. Культура земледелия в условиях изменяющегося климата приобретает все более важное значение. В районах с более высоким уровнем агротехнологий снижаются последствия проявления неблагоприятных погодных условий на урожайность культур, минимизируются потери урожая. В связи с наблюдаемыми изменениями погодно-климатических условий территории изучение динамики основных агроклиматических показателей и их влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур актуально и своевременно. Важным аспектом является оценка зависимости урожайности от климатических изменений как основа для построения агроклиматических моделей.

Исследованиям климатообусловленной изменчивости продуктивности сельскохозяйственных культур и их прогнозированию, построению адекватных моделей урожайности, которые могут быть использованы при разработке краткосрочных прогнозов урожаев, посвящены научные работы многих исследователей [1–7], однако данный проблемный вопрос окончательно не решен в силу своей сложности и многогранности.

В качестве исследуемой культуры нами выбран картофель, традиционно занимающий важное место в аграрном секторе Беларуси. Агрометеорологические условия территории республики позволяют возделывать эту культуру повсеместно и получать устойчивые высокие урожаи. Урожайность картофеля определяется биологическими особенностями сорта, уровнем агротехнических приемов при его возделывании, а также погодными условиями. Картофель – культура умеренного климата, не выдерживает отрицательных температур, плохо реагирует на температуру ниже 7–8 °С и в то же время сильно угнетается уже при температуре почвы выше 20 °С. Картофель требователен к свету и влажности почвы. Для полного развития растений с учетом скороспелости сорта необходима определенная сумма активных температур (среднесуточная температура выше 10 °С). Для ранних и среднеранних сортов оптимальной считается 1000–1400 °С, среднепоздних и поздних – 1400–1600 °С [8]. Согласно исследованиям, выполненным под руководством академика В.Ф. Логинова [3], установлено, что современное потепление климата характеризуется существенным повышением теплообеспеченности территории Беларуси. В период с 1977 по 2015 г. суммы активных температур выше 10 °С по территории Беларуси выросли на 300–450 °С. Продолжительность вегетационного периода выросла на 9–15 дней. Прогнозы изменения климата, полученные в ходе экспериментов на глобальных численных моделях, предсказывают дальнейшее улучшение теплообеспеченности территории Беларуси.

Цель работы – установить влияние на урожайность картофеля изменяющихся погодно-климатических условий территории Беларуси и оценить ее климатообусловленную изменчивость для построения малопараметрической модели продуктивности культуры.

Материалы и методы исследования. При выполнении исследования нами использованы материалы по урожайности картофеля Министерства статистики и анализа Республики Беларусь и статистические данные Республиканского гидрометеоцентра по основным составляющим климата – температуре воздуха и атмосферным осадкам [9–12]. Исследованием охвачен временной интервал с 1960 по 2019 г.

Самая простая оценка связи урожайности сельскохозяйственных культур с климатическими факторами может быть получена из исследования корреляции годовых и среднемесячных значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков со статистическими данными соответствующего ряда по урожайности, что позволяет сделать вывод о наличии связи и ее знаке. Для аналитического выражения установленных связей применяется регрессионный анализ. Представленное исследование выполнено посредством применения методов математической статистики, включая многофакторный корреляционно-регрессионный анализ, деление ряда на однородные отрезки, графический метод исследования рядов распределения значений случайной величины, построение малопараметрической модели. Методика прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с заблаговременностью в один год подробно описана в работе [2] и использована нами при расчете урожайности озимых зерновых культур Беларуси [13].

Анализ и статистическое описание динамики какого-либо существенного колеблющегося показателя начинаются с выявления формы его тренда. Следующий шаг – статистическая оценка надежности построенного тренда, отражающего тенденции развития изучаемого процесса. Трендовая составляющая урожайности определяется агротехническими факторами и отражает в целом достаточно устойчивую тенденцию. Отклонения от тренда обусловлены, как правило, изменяющимися погодно-климатическими условиями, экстремальными климатическими явлениями. Однако это утверждение не совсем корректно, так как чрезмерные антропогенные нагрузки, резкое снижение уровня агротехники также находят отражение в трендовой составляющей урожайности культуры.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 представлен график динамики изменчивости урожайности картофеля с посевных площадей в сельскохозяйственных организациях Беларуси за период 1960–2019 гг. с полиномиальным трендом, отражающим тенденцию изменения продуктивности культуры. Надежность построенного тренда подтверждается достаточно высоким значением коэффициента детерминации (R^2). Обычно в качестве трендовой

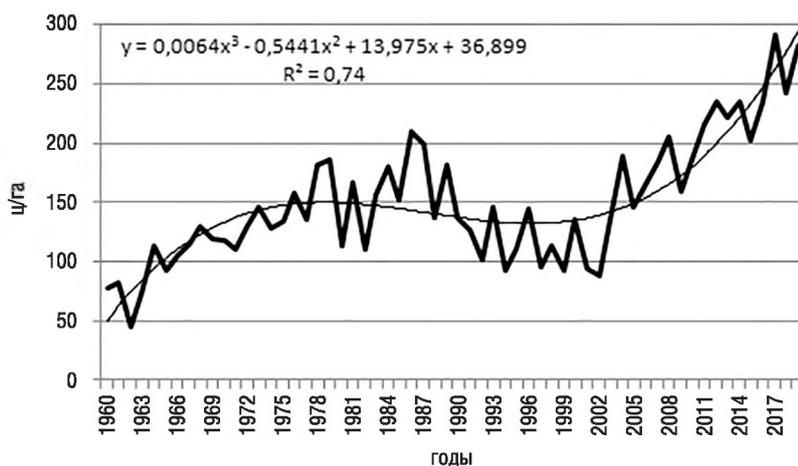


Рис. 1. Динамика изменчивости урожайности картофеля в Беларуси за период 1960–2019 гг. с полиномиальным трендом

Таблица 1. Средние значения урожайности картофеля (ц/га) в Беларуси в выделенных временных интервалах

Интервал, годы	Продолжительность, лет	Среднее значение урожайности
1960–1963	4	69,8
1964–1971	8	112,8
1972–1990	19	154,8
1991–2003	13	112,8
2004–2019	16	212,1

составляющей выбирается кривая 2-го порядка, однако в данном случае полиномиальный тренд 3-й степени позволил значительно повысить величину достоверности аппроксимации кривой, описывающей технологические факторы (значение R^2 повысилось от 0,49 до 0,74).

На графике видно, что в начальные годы рассматриваемого периода средняя по Беларуси урожайность картофеля была крайне низкой, затем последовал ее рост, который, однако, нельзя назвать равномерным. В целом динамика положительная, осложненная коротковолновой (2–3 года) изменчивостью, демонстрирующая значительный рост продуктивности культуры.

Анализ колебаний урожайности нами выполнен посредством использования алгоритма и программного комплекса по разбиению статистических рядов (в том числе многомерных) на однородные отрезки с использованием критерия Д.А. Родионова [14]. Результаты представлены в табл. 1. Только в двух выделенных временных интервалах среднее значение урожайности картофеля превысило средний показатель (149,8 ц/га) за 1960–2019 гг.

Расчет урожайности культуры будем производить по формуле:

$$Y(t) = Y_{тр}(t) + \Delta Y, \tag{1}$$

где $Y(t)$ – расчетная урожайность культуры в календарном году, ц/га; $Y_{тр}(t)$ – трендовая составляющая расчетной урожайности культуры в календарном году, ц/га; ΔY – климатическая составляющая расчетной урожайности культуры, ц/га.

Тренд продуктивности картофеля с достаточно высоким коэффициентом детерминации на интервале 1960–2019 гг. описан функцией:

$$Y_{тр}(t) = 0,0064 \cdot t^3 - 0,5441 \cdot t^2 + 13,975 \cdot t + 36,899, \tag{2}$$

где t – год по порядку, начало – 1960 г.

По полученным значениям тренда рассчитаны отклонения фактической урожайности от фоновой (трендовой составляющей). Построенная гистограмма распределения отклонения фактической урожайности картофеля от трендовой составляющей в Беларуси позволяет визуально оценить величину и характер разброса данных. Установлено, что временной ряд отклонений подчиняется нормальному закону распределения вероятностей (рис. 2).

Для более наглядного представления на рис. 3 показана диаграмма климатообусловленных отклонений урожайности картофеля от агротехнического тренда, на которой четко видна волнообразная структура изменений. На построенном графике выделяется началь-

ный сглаженный период, сменившийся значительными волнами.

Наибольшие климатообусловленные снижения урожайности картофеля отмечаются в 1962, 1980, 1982, 1992, 1994, 1997, 1999, 2001, 2002, 2015 и 2018 годах. Потери урожайности в эти годы, за исключением двух последних в перечне, варьировали от 30 до 60 %. Самые значительные в процентном отношении недоборы были в 1962-м и 2002-м годах.

Рассмотрим более подробно погодно-климатические особенности выделенных лет. При анализе воспользуемся данными Белгидромета и результатами выполненных ранее и опубликованных исследований [5].

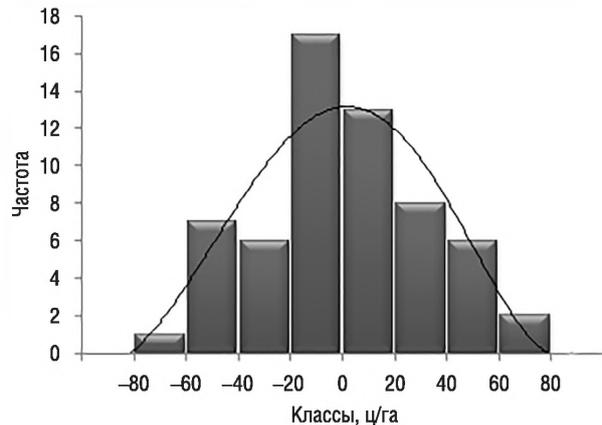


Рис. 2. Гистограмма распределения отклонения фактической урожайности картофеля от тренда

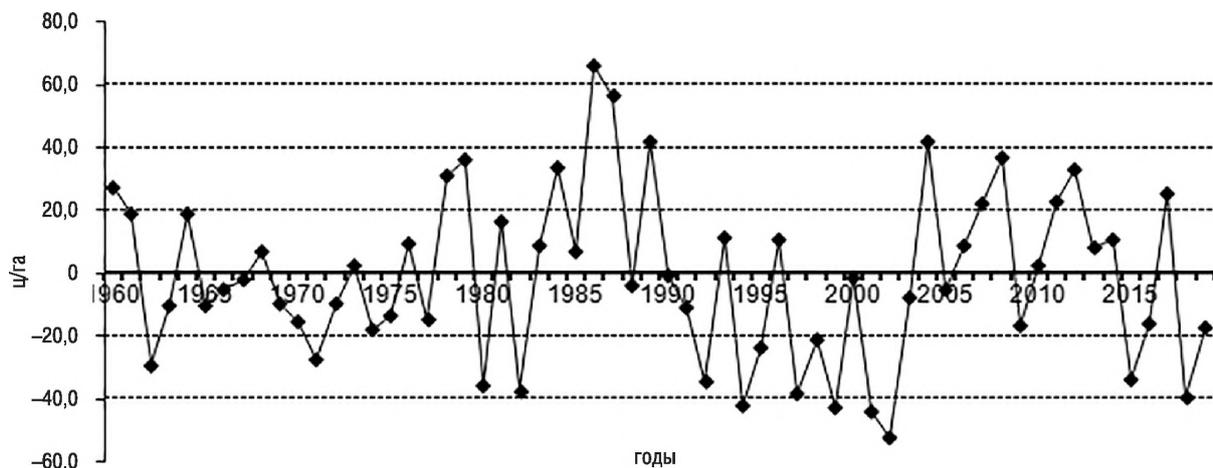


Рис. 3. Климатообусловленное отклонение урожайности картофеля от трендовой составляющей (1960–2019 гг.)

Установлено, что большинство выделенных лет характеризуется как годы с проявлением таких экстремальных явлений, как заморозки и засухи. В 1992 г. было 60 дней с засухой; в 1994 г. – 44 засушливых дня, в этот год также наблюдались весенние заморозки (урожайность картофеля с посевной площади в среднем по республике оказалась низкой – 92 ц/га); 1999 г. характеризуется наличием значительного количества дней с температурой, превышающей 25 °С и значением ГТК, равным 1,1 (82 засушливых дня), а также весенними заморозками (урожайность составила 92 ц/га); 2002 г. явился аномально засушливым (140 дней с засухой) (урожайность – 88 ц/га). Кроме того, согласно [16], снижение урожайности картофеля на 20 % и более наблюдаются не только в засушливые, но и в отдельные влажные годы. Такими холодными (влажными) годами из представленного выше перечня были 1962-й и 1980-й годы.

2015 г. в Беларуси считается одним из самых теплых со среднегодовой температурой воздуха, равной 8,5 °С, при этом его можно отнести к особо засушливым годам – на юге республики выпало осадков на 20 % меньше нормы. В 2018 г. на протяжении всего года, за исключением февраля и марта, наблюдались положительные аномалии температуры воздуха. В мае и июне по югу страны отмечалась почвенная засуха, кроме того, в этот период на территории республики в воздухе и на почве были заморозки, что также повлияло на урожайность сельскохозяйственных культур. Несмотря на аномальные условия этих лет, урожайность картофеля оказалась высокой и ее климатообусловленные потери составили менее 17 %, что свидетельствует об адаптации в последние годы аграрного сектора к погодно-климатическим изменениям.

В качестве благоприятных лет для возделывания картофеля, согласно графику отклонений урожайности от трендовой составляющей, можно выделить 1978, 1979, 1984, 1986, 1987, 1989, 2004, 2008 и 2012 годы. В этот перечень не включается 1960-й, как начальный для построенного полиномиального тренда, так как если бы нами использовался линейный тренд, то вопрос стоял бы не о приросте, а о незначительном недоборе урожайности культуры. В процентном соотношении климатообусловленный прирост урожайности картофеля в эти годы варьировал от 14 % в 2012 г. до 32 % в 1986 г.

Средние значения весенних и летних температур в 1986 г. несколько превышали многолетнюю климатическую норму, а весенние суммарные атмосферные осадки уступали многолетней норме. Если рассматривать по месяцам, то температура мая–июня на 1 °С превышала норму, суммарные осадки в эти месяцы были меньше климатических норм на 28 и 14 мм соответственно. В этот год зафиксировано 14 дней с засухой на всей территории, кроме Витебской области. В августе ситуация изменилась – при незначительном превышении температурного показателя суммарные атмосферные осадки значительно превысили климатическую норму (на 49 мм), однако эти отклонения не повлияли отрицательно на уровень продуктивности картофеля.

С целью установления связи урожайности картофеля с основными климатическими факторами построены регрессионные модели зависимости продуктивности культуры от средних значений весенних и летних температур воздуха, а также от весенних и летних сумм атмосферных осадков на временном интервале 1960–2019 гг. (рис. 4).

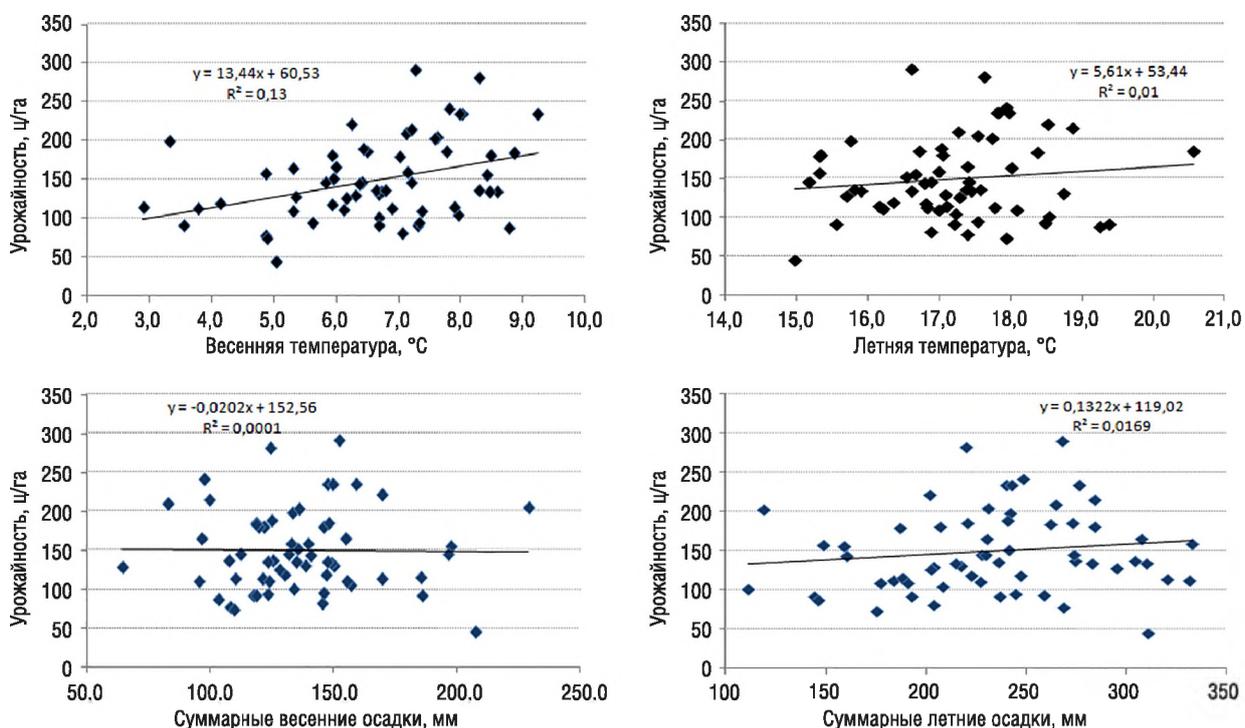


Рис. 4. Регрессионные модели связи урожайности картофеля (ц/га) со средними весенними и летними температурами воздуха (°С), а также с весенними и летними суммами атмосферных осадков, мм (Беларусь, 1960–2019 гг.)

Ранее аналогичный анализ был выполнен для временного интервала 1960–2003 гг. [5]. Сравнение полученных результатов показало, что произошедшие за последующие 16 лет изменения температурно-влажностного режима территории (повышение средних весенних и летних температур на 1 °С, а также увеличение суммарных значений выпавших осадков) сказались на характере зависимости урожайности картофеля от основных климатических факторов. Так, повысилась значимость весенних температур (майских) и температур летнего периода, причем если до 2003 г. наблюдалась обратная связь между температурным режимом летнего пе-

риода и урожайностью картофеля, то для интервала 1960–2019 гг. эта зависимость в среднем стала положительной (только для июльских температур связь обратная). Ранее наблюдалась выраженная отрицательная корреляция с весенними суммами атмосферных осадков, ставшая незначимой для 60-летнего интервала. Несколько повысилась связь урожайности картофеля с летними осадками – коэффициент детерминации стал 0,02 против 0,004. Это свидетельствует о повышении роли увлажнения в формировании урожая картофеля в условиях потепления климата.

Методом корреляционного анализа установлено, что на исследуемом 60-летнем интервале урожайность картофеля зависела от температуры воздуха мая–июня, а также от температуры августа. Установлена корреляционная связь с летними атмосферными осадками.

Методом множественного регрессионного анализа определены аналитические выражения связи между климатообусловленными отклонениями урожайности и отклонениями основных климатических показателей месяцев, оказывающих наиболее значимое влияние на продуктивность картофеля, от многолетних климатических норм. Для июньских температур и атмосферных осадков, а также для осадков июля плотность вероятности распределения Стьюдента превысила значение 0,05, поэтому можно сделать вывод, что данные независимые переменные практически не влияют на зависимую переменную (урожайность культуры). В расчетах нами будут учитываться отклонения месячных значений температуры мая и августа от климатической нормы, а также отклонения суммарных атмосферных осадков августа, оказавших наибольшее влияние на формирование урожайности картофеля в Беларуси.

В соответствии с рекомендациями Всемирного метеорологического общества (ВМО) климатические нормы рассчитывают за 30-летний период. В связи с постоянным изменением климата 17-й Всемирный метеорологический конгресс, состоявшийся в Женеве в июне 2015 г., рекомендовал рассчитывать климатические нормы за период 1981–2010 гг. В связи с тем что климатические нормы, особенно температуры воздуха, существенно изменились, в целях обеспечения отраслей экономики новыми актуализированными климатическими нормами и в соответствии с рекомендациями ВМО, гидрометеослужба Республики Беларусь перешла с 1 июля 2017 г. на новые климатические нормы по температуре и осадкам за период 1981–2010 гг. Эти нормы отражают климатические условия периода потепления. Климатическая норма среднегодовой температуры воздуха Беларуси, согласно указанному документу, составляет 6,7 °С, т.е. повысилась почти на 1 °С по сравнению с ранее действующей нормой [15]. В представленном исследовании нами учитывалась изменчивость многолетней климатической нормы. Как вариант можно рассматривать отклонения климатических показателей от их трендовых составляющих.

Ниже представим полученный полином 1-й степени, характеризующий климатическую составляющую расчетной урожайности картофеля для Беларуси в 1960–2019 гг.:

$$\Delta U = 3,452 \cdot \Delta T_5 - 5,373 \cdot \Delta T_8 + 0,271 \cdot \Delta O_8 - 0,845, \quad (3)$$

где ΔT_i – отклонение месячных значений температуры от климатической нормы; ΔO_i – отклонение суммарных месячных осадков от климатической нормы; i – порядковый номер месяца.

Подставив результаты, полученные по уравнениям (2) и (3), в уравнение (1), получим расчетную урожайность картофеля. Графически рассчитанная урожайность картофеля в Беларуси в 1960–2019 гг. представлена на рис. 5.

Определение достоверности модели можно считать одной из важнейших проблем при моделировании систем. От ее решения зависит степень доверия к полученным результатам. Адекватность модели, ее соответствие моделируемому объекту или процессу реальной ситуации в какой-то мере является условным, так как полного соответствия реальному объекту быть не может, иначе это была бы не модель, а сам объект исследования.

Расчетный уровень значимости построенной модели равен 0,009, что значительно меньше заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$. Поскольку фактическое значение критерия Фишера, равное 4,2, превышает $F_{\text{табл}}(2,8)$, можно сделать вывод о статистической надежности и значимости математической модели, достаточности включенных в уравнение переменных для описания

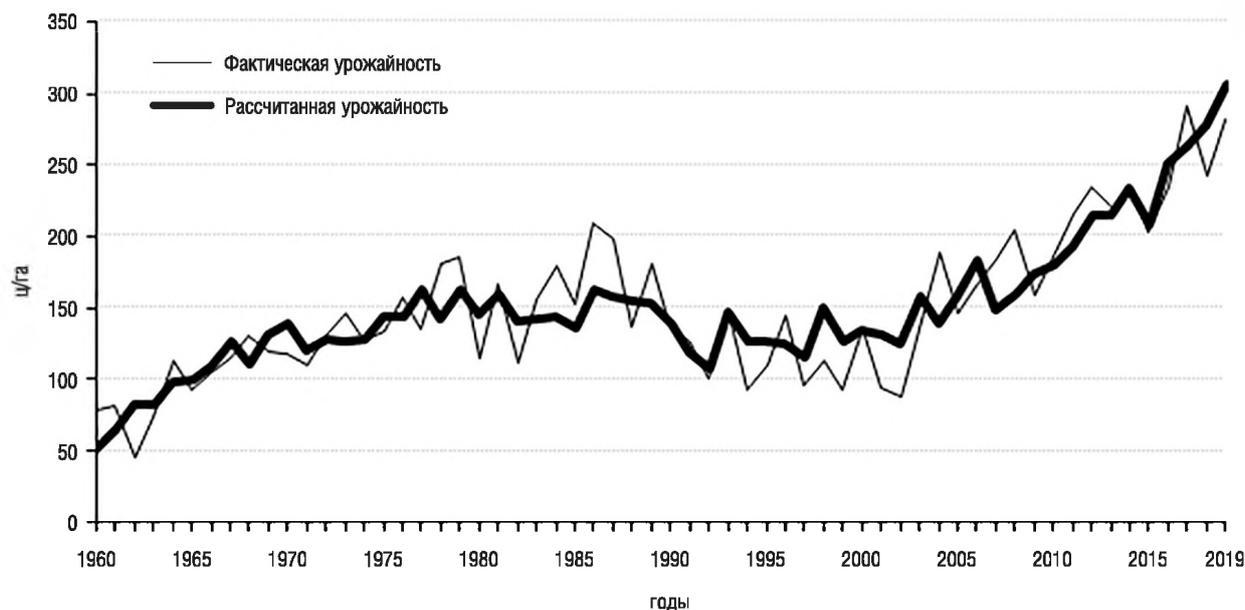


Рис. 5. Фактическая и рассчитанная динамика урожайности картофеля

климатической расчетной составляющей. В результате визуального анализа построенных кривых можно сделать вывод об их согласованности, однако следует отметить, что экстремальные значения фактической урожайности не всегда описываются с желаемой точностью. Построенная модель является адекватной, о высокой корреляционной связи фактической и расчетной урожайности картофеля свидетельствует коэффициент корреляции, равный 0,89, а также материалы табл. 2. Ошибкой до 15 % охвачено более 60,0 % лет.

Т а б л и ц а 2. Ошибки расчета урожайности картофеля

Показатель	Отклонения урожайности, %						
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–35	35–55	>55
Количество лет, %	18,3	23,3	21,7	8,3	20,0	6,7	1,7
Нарастающий итог, %	18,3	41,6	63,3	71,6	91,6	98,3	100,0

Расчеты проводились по среднемесячным значениям температуры воздуха и суммарным атмосферным осадкам в целом для территории Беларуси, что в результате дает обобщенную, сглаженную картину. В региональных исследованиях показатели, определяющие климатообусловленные отклонения урожайности, будут другими, отражающими особенности исследуемых территорий.

Заключение. В результате выполненных статистических расчетов выявлены основные климатические факторы, повлиявшие на урожайность продуктивности картофеля в Беларуси на временном интервале 1960–2019 гг. Выполнен анализ графиков, характеризующих продуктивность картофеля и их климатозависимые отклонения, построена простейшая расчетная мало-параметрическая модель урожайности. Построенную модель можно считать адекватной, о чем свидетельствует высокая корреляционная связь фактической и расчетной урожайности, а также результаты их сходимости.

Список использованных источников

1. Давыденко, О. В. Зависимость урожайности картофеля и сахарной свеклы от метеорологических показателей периода вегетации / О. В. Давыденко, П. С. Лопух // Вес. Беларус. дзярж. лед. ун-та. Сер. 3. – 2010. – №3. – С. 56–62.
2. Логинов, В. Ф. Оценка влияния климатических факторов на динамику урожайности основных сельскохозяйственных культур в Брестской области / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Природные ресурсы. – 2006. – №3. – С. 5–22.

3. *Логинов, В. Ф.* Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
4. *Лысенко С. А.* Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 4. – С. 48–59.
5. *Сачок, Г. И.* Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси / Г. И. Сачок, Г. А. Камышенко – Минск: Белорусская наука, 2006. – 243 с.
6. *Трубилин, А. И.* Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: учеб. пособие / А. И. Трубилин, Г. Ф. Петрик, А. Г. Прудников. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 95 с.
7. *Уланова, Е. С.* Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии / Е. С. Уланова, В. Н. Забелин. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.
8. Настольная книга картофелевода / С. А. Турко [и др.]; под ред. С. А. Турко; Науч.-практ. центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству. – Минск, 2007. – 165 с.
9. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь, 2017 (стат. сб.). – Минск, 2017. – 235 с.
10. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь, 2020 (стат. сб.). – Минск, 2020. – 202 с.
11. Валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь за 2016 год (стат. бюлл.). – Минск, 2017. – 56 с.
12. Валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь за 2019 год (стат. бюлл.). – Минск, 2019. – 57 с.
13. *Камышенко, Г. А.* Расчет урожайности озимых зерновых культур Беларуси / Г. А. Камышенко // Природопользование. – Минск, 2009. – Вып. 16. – С. 133–140.
14. *Родионов, Д. А.* Статистические методы разграничения геологических объектов по комплексу признаков / Д. А. Родионов – М.: Недра, 1968. – 160 с.
15. Справочник по климату Беларуси. Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. – Режим доступа: <https://pogoda.by/climat-directory/>. – Дата доступа: 20.03.2021.
16. *Логинов, В. Ф.* Экстремальные климатические явления: пространственно-временные закономерности их изменений и предпосылки прогнозирования / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка. – Минск, 2012. – 130 с.

Поступила 12.04.2021