
НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

УДК 630:551.58(476.7)

А.А. Волчек, Н.Н. Шпендик

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ НА ТЕРРИТОРИИ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье представлены результаты исследований урожайности картофеля Брестской области. Описаны многолетние колебания урожайности с 1954 по 2006 гг. Рассмотрено влияние различных факторов на урожайность сельскохозяйственных культур. Проведен анализ взаимосвязи урожайности и климатических параметров (температура воздуха, среднемесячные осадки и влажность 50 см слоя почвы). С помощью регрессионного анализа полиномом первой степени описана погодная составляющая урожайности картофеля. Используя уравнения, построенные для каждого района, получена максимальная фоновая урожайность. На основании этих данных построена карта максимальной фоновой урожайности Брестской области. Дана оценка влияния изменения климата на урожайность картофеля. В связи с этим расчетный период был разбит на два интервала: с 1960 по 1984 гг. и с 1985 по 2001 гг., для которых построены регрессионные модели.

Введение

Одним из основных направлений развития экономики Брестской области является сельское хозяйство. Этому способствует ее географическое положение, климатические особенности, а также крупномасштабные мелиорации, проводимые во второй половине прошлого столетия. Однако климатические колебания, учащение неблагоприятных метеорологических явлений, неуправляемость мелиоративных систем – все это в совокупности оказывает значительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Можно предположить, что зависимость сельскохозяйственного производства от климатических факторов усилится, несмотря на развитие культуры земледелия. Для обеспечения продовольственной безопасности страны необходимо получение стабильных и высоких урожаев. Поэтому анализ и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур является одной из важных задач. На 1 января 2007 г. посевные площади в Брестской области занимают 869,1 тыс. га, из них под картофелем находится 81,0 тыс. га, что составляет около 10% [2].

Задачей исследования является установление пространственно-временных закономерностей формирования урожайности картофеля Брестской области и разработка вероятностного метода прогноза.

Материалы и методы исследования

Основу исследований составили многолетние ряды наблюдений за урожайностью картофеля с 1954 по 2006 гг. Использованы данные Министерства статистики и анализа Республики Беларусь об урожайности культур и материалы Республиканского гидрометеоцентра о среднемесячных количествах осадков, температурах воздуха и запасах почвенной влаги 50 см слоя почвы по 16 районам Брестской области. Для описания многолетних колебаний урожайности использованы следующие статистические модели: последовательность независимых случайных величин; простая и сложная цепь Маркова. Кроме того, для выявления циклов использовался СВАН-анализ, а также методика моделирования урожайности основных сельскохозяйственных культур, детально описанная в работе [1].

Факторы, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур, можно условно разделить на две группы: к первой группе относятся плодородие почв, уровень агротехники, сорта культур, антропогенные нагрузки и т. д.; ко второй – климатические условия. Тогда урожайность можно представить как:

$$Y(t) = Y_{\phi}(t) \pm \Delta Y(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – планируемая урожайность в расчетном календарном году, ц/га; $Y_{\phi}(t)$ – фоновая урожайность в том же году; $\pm \Delta Y$ – отклонение фактической урожайности от фоновой, ц/га.

Влияние технологических факторов, таких, как плодородие почв, уровень агротехники, сорта культур, антропогенные нагрузки, с достаточной для практики точностью можно описать многочленом второй степени.

Разность между фактической урожайностью и фоновой составит отклонения, которые определяются в основном погодными условиями.

Динамика погодной составляющей урожайности $\pm \Delta Y(t)$ может быть представлена в виде аддитивной функции.

$$\Delta Y(t) = u(t) \pm \eta(t), \quad (2)$$

где $u(t)$ – детерминированная функция, $\eta(t)$ – случайная составляющая.

Тренды погодной составляющей урожайности могут быть описаны с помощью различных статистических методов, в частности:

$$u(t) = f(\Delta P_i, \Delta T_i, \Delta W_i), \quad (3)$$

где ΔP_i – отклонение атмосферных осадков от нормы в i -тый интервал времени; ΔT_i – отклонение температуры воздуха в i -тый интервал времени; ΔW_i – отклонение влагозапасов 50 см почвы в i -тый интервал времени.

Случайная составляющая урожайности определяется вероятностным методом, т.е.

$$\pm \eta(P_{\%}) = \pm \bar{\eta}(\Phi_{P_{\%}} \cdot C_v + 1), \quad (4)$$

где $\bar{\eta}$ – среднее значение случайной составляющей урожайности, ц/га; $\Phi_{P_{\%}}$ – числа Фостера расчетной обеспеченности; C_v – коэффициент вариации.

Используя стандартные статистические методы, находят значения $\bar{\eta}$, C_v и C_s . Причем случайную составляющую находят как для благоприятных по урожайности ($P < 50\%$), так и для неблагоприятных ($P > 50\%$) лет. По найденным параметрам строят теоретическую кривую обеспеченности. Далее, используя таблицу случайных чисел, путем розыгрыша моделируются значения обеспеченности (P_i). Таким образом, имея некоторый ограниченный объем информации, можно получить, при принятом законе распределения, временной ряд урожайности практически не ограниченной длины.

Анализ взаимосвязи урожайности и климатических параметров проводится в два этапа. На первом этапе находят отклонения фактической урожайности от фоновой. На втором – анализ полученных временных рядов и агроклиматических показателей.

Пространственная изменчивость исследовалась с помощью карт, построенных для максимальной фоновой урожайности.

На второй стадии выполнялось исследование статистической структуры полей фактической урожайности с помощью пространственных корреляционных функций и функций пространственной асинхронности.

Для исследования цикличности использованы автокорреляционные функции (АКФ) и процедура спектрально-временного анализа (СВАН) урожайности. Длина окна принята равной 15 годам, т. е. 0,33 от продолжительности ряда.

Обсуждение результатов

Урожайность определяется наследственными свойствами растений и влиянием энергетического, водного и пищевого режимов почвы и атмосферы.

Потребность растений в тепле, влаге и питании в каждый период вегетационного цикла обусловлены эволюцией и проявляются в виде собственных оптимумов элементов среды. Если комплекс условий среды находится в оптимуме, то формируется максимальный урожай.

Агроклиматические условия Брестской области благоприятны для развития картофелеводства. Однако климатические характеристики имеют существенную изменчивость как от года к году, так и внутри сезона. Температура воздуха играет немаловажную роль в формировании урожая. Так, прорастание почек клубней в почве начинается при $5-8^{\circ}\text{C}$, всходы и молодые растения повреждаются при заморозках 2°C , оптимальная ночная температура для образования клубней $10-13^{\circ}\text{C}$, при 20°C в почве и выше наступает тепловое вырождение картофеля.

На рисунке 1 представлена динамика средней урожайности картофеля по Брестской области.

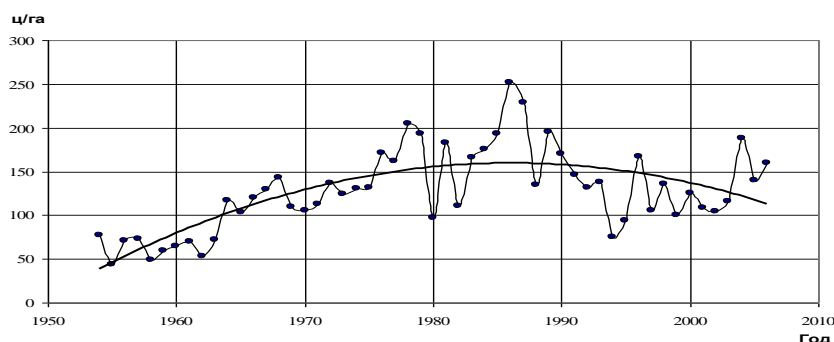


Рисунок 1 – Динамика урожайности картофеля по Брестской области

Невысокая урожайность сельскохозяйственных культур по Брестской области в начале 69-х годов прошлого столетия была обусловлена отсутствием высокопродуктивных сортов, недостаточным внесением удобрений в послевоенные годы и т. п. Сочетание благоприятных климатических (количество и равномерность осадков в вегетационный период, сумма активных температур) и агротехнических факторов в середине 80-х способствовало получению высоких урожаев. С повышением уровня агротехники, улучшением водно-воздушного и питательного режима почв, с использованием новых сортов урожайность повысилась, и пик ее пришелся на 1986 г. Так, урожайность картофеля в среднем по области составила 252 ц/га. Меньше всего – в Барановичском районе (214 ц/га), максимум картофеля с 1 га было собрано в Лунинецком районе (311 ц/га). Однако с конца 80-х и до начала нынешнего столетия наблюдается устойчивая тенденция к снижению урожайности картофеля. Главными причинами такой тенденции являются ухудшение агротехнического обеспечения вследствие снижения уровня развития экономики республики (внесение минеральных удобрений под картофель к 1999–2000 гг. по отношению к середине 80-х снизилось на 83%, органических – на 13%; были сведены к минимуму механизированные и профилактические обработки в технологическом цикле); деградация мелиоративных систем и мелиорированных земель (вследствие ухудшения функционирования существующей мелиоративной сети, больших потерь органического вещества на мелиорированных и прилегающих к ним землях понизился бонитет почв, что не могло не отразиться на урожайности); увеличение случаев экстремальных климатических факторов во время интенсивной вегетации (поздневесенние и летние заморозки, продолжительные засушливые периоды) и другие причины.

Уравнения линии тренда урожайности картофеля имеет вид:

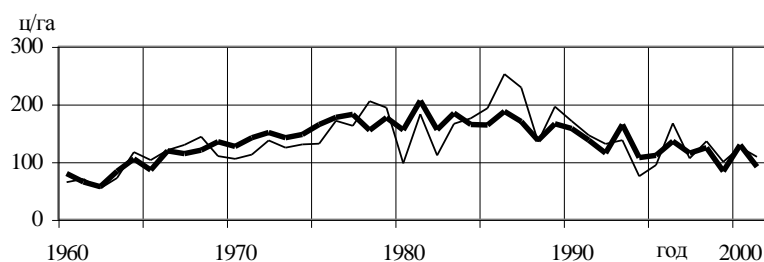
$$y_{\phi}(t) = -0,1172 \cdot t^2 + 465,5 \cdot t - 462114, \quad (R = 0,47). \quad (5)$$

Проведенный регрессионный анализ позволил описать погодную составляющую урожайности картофеля полиномом первой степени:

$$u(t) = -0,9 \cdot \Delta W_5 + 5,8 \cdot \Delta T_5 - 7,32 \cdot \Delta T_8 - 0,4 \quad (R = 0,54) \quad (6)$$

где ΔT – отклонение месячной температуры воздуха от нормы того месяца; ΔP , ΔW – тоже соответственно атмосферные осадки и влажность 50 см слоя почвы; индекс обозначает номер месяца начиная с января.

На рисунке 2 представлены наблюдаемые и рассчитанные средние урожайности картофеля по области.



**Рисунок 2 – Фактическая и рассчитанная динамика
урожайности картофеля в Брестской области**

Результаты расчета показали, что наиболее эффективны продуктивные влагозапасы мая и температура воздуха в мае и августе для картофеля. Температура воздуха играет немаловажную роль в формировании урожая. Прорастание почек клубней в почве начинается при 5–8⁰С, всходы и молодые растения повреждаются при заморозках – 2⁰С. Оптимальная ночная температура для образования клубней 10–13⁰С. При 20⁰С в почве и выше наступает тепловое вырождение картофеля: удлиняются стебли и боковые побеги, сужаются листовые пластинки, уменьшается содержание хлорофилла в листьях, сокращается урожай и ухудшается его качество. Поэтому в уравнении температура воздуха в августе находится со знаком «←».

Дефицит почвенной влаги и недостаток питательных веществ тормозят ростовые процессы, листья прекращают рост. Увлажненность почвы в мае, как правило, достигает и превышает оптимум для картофеля, следовательно, избыток отрицательно сказывается на урожайности. Температура воздуха в мае в значительной мере определяет длину и массу стебля. Положительная взаимосвязь существует между скоростью роста и конечной продуктивностью сортов и гибридов. Эти показатели используются для контроля за ходом формирования урожая и прогнозирования продуктивности растений.

Таким образом, можно констатировать, что полученная модель адекватно отражает реальную картину урожайности картофеля в Брестской области.

Смоделированные ряды урожайности отличаются от фактических меньшей изменчивостью, поэтому при моделировании необходимо в погодные данные вводить случайную составляющую $\eta(P)$. Случайная составляющая моделируется по формуле (4). Величина случайной составляющей в зависимости от обеспеченности колеблется от 57,6 ц/га ($P = 5\%$) до -42 ц/га ($P = 95\%$). Случайные составляющие вносят определенный вклад и в ряде случаев должны учитываться при моделировании урожайности.

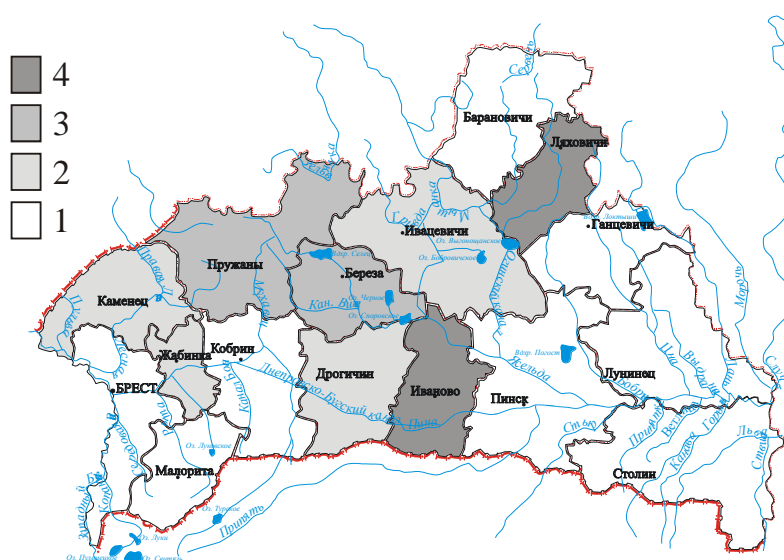
Используя уравнения аналогичные (5), построенные для каждого района, получили максимальную фоновую урожайность. На основании этих данных построена карта максимальной фоновой урожайности (рисунок 3). Для установления градации деления районов по максимальной фоновой урожайности сельскохозяйственных культур использовался статистический критерий Стьюдента с помощью которого установлена наименьшая существенная разница для средних величин урожайности по районам. Затем эта величина округлялась до целых величин. Максимальная фоновая урожайность картофеля по районам Брестской области имеет пестрый характер. В Ивановском и Ляховичском районах она превышает 340 ц/га, в Березовском и Пружанском районах – 320–340 ц/га, несколько меньшая максимальная фоновая урожайность (300–320 ц/га) имеет место в Дрогичинском, Жабинковском, Ивановском и Каменецком районах, в остальных районах она менее 300 ц/га.

Интересно проследить изменение погодных условий. Исходя из физиологических особенностей сельскохозяйственных культур наиболее благоприятным является теплый с повышенной влажностью год. Благоприятным по урожайности год рассматриваемых культур за исследуемый период наблюдения является 1986–1987 гг. Как видно из таблицы, в зимний период выпало осадков ниже нормы, однако повышенные осадки в марте, мае и июне обеспечили оптимальные

влажностные запасы в почве, что благоприятно сказалось на урожайности, хотя по температуре воздуха год был менее благоприятен.

Количественная оценка асинхронности урожайности картофеля между Брестским и Лунинецким районами (наиболее удаленные друг от друга районы Брестской области) в различные по погодным условиям годы оценивалась с помощью коэффициента асинхронности. Асинхронность в урожайности картофеля имеет место только в неблагоприятные по климатическим условиям годы и достигает 1,2, что соответствует увеличению урожайности на 20%. Поэтому этот факт необходимо учитывать в прогнозировании урожайности.

Для оценки влияния изменения климата на урожайность картофеля расчетный период был разбит на два интервала: с 1960 по 1984 гг. и с 1985 по 2001 гг., для которых построены регрессионные модели.



1 – более 340, 2 – 340–320, 3 – 320–300, 4 – менее 300.

Рисунок 3 – Карта максимальной фоновой урожайности картофеля по Брестской области, ц/га

Таблица 1 – Климатические параметры за период с октября 1986 по сентябрь 1987 г.

Месяцы	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
атмосферные осадки, мм												
значение	19,6	33,0	28,4	34,2	20,9	48,5	24,4	73,2	94,5	59,6	55,5	49,2
P, %	79,5	72,7	81,8	40,9	70,5	13,6	84,1	13,6	20,5	68,2	52,3	50,0
температура, °С												
значение	6,8	3,29	-2,9	-	-3,2	-5,0	5,2	12,7	16,3	17,7	14,7	11,6
P, %	65,9	22,7	61,4	97,7	47,7	93,2	90,9	65,9	54,5	52,3	95,5	68,2

В результате регрессионного анализа были получены полиномы первой степени для описания погодной составляющей урожайности картофеля, структура которых имеет вид:

$$u(t) = 6,86 \cdot \Delta T_6 - 5,47 \cdot \Delta T_7 - 4,60 \cdot \Delta T_8 - 0,25 \cdot \Delta P_7 - 4,24, \quad (R = 0,59); \quad (7)$$

$$u(t) = 14,60 \cdot \Delta T_4 + 23,92 \cdot \Delta T_6 - 21,33 \cdot \Delta T_7 - 2,90 \cdot \Delta P_4 + \\ + 1,43 \cdot \Delta P_5 + 0,28 \cdot \Delta P_7 - 0,44 \cdot \Delta P_8 + 2,19 \cdot \Delta W_4 - 2,24 \cdot \Delta W_5 - 2,51 \cdot \Delta W_7 + 1,41 \cdot \Delta W_8 - 1,97, \quad (R = 0,69). \quad (8)$$

Проведенный анализ показывает, что за период с 1984 по 2001 гг. произошли существенные трансформации в моделях по сравнению с периодом 1960–1984 гг. Произошло увеличение статистически значимых факторов, что свидетельствует об увеличении чувствительности современных сельскохозяйственных культур к погодным условиям. Это обусловлено тем, что при культивировании высокоурожайных сельскохозяйственных культур необходимо особо тщательно выдерживать микроклимат на сельскохозяйственных полях. Поэтому в нынешних условиях усиливается роль мелиорации в получении программируемых урожаев.

Анализ временных рядов отклонений фактической урожайности от фоновой показывает, что они имеют определенные циклы, характерные для климатических характеристик. Для разработки прогнозных моделей необходимо установить в анализируемых временных рядах циклы. В связи с тем, что циклы явно не прослеживаются, использован СВАН-анализ. Исходя характеристик СВАН-диаграммы можно выделить два цикла: мощный 12-летний (1980–1992 гг.) и 3-летний (1975–1987 гг.).

Исходя из результатов СВАН-анализа и регрессионного анализа, используя сложную цепь Маркова, получено частное прогнозное уравнение для картофеля, которое имеет вид:

$$u(t) = -0,229 \cdot u(t-1) - 0,318 \cdot u(t-4) - 0,09, \quad (R = 0,43) \quad (9)$$

Приведенные прогнозные уравнения были получены за период до 1995 г. с целью их проверки на независимом материале за период с 1996 по 2005 гг.

Заключение

Детально проанализирована динамика урожайности картофеля и установлены основные факторы, определяющие его урожайность. Показано, что величина асинхронности погодной составляющей урожайности картофеля особенно велика в неблагоприятные по климатическим условиям годы. Разработана методика прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с заблаговременностью в 1 год, которая позволила получить удовлетворительные результаты при прогнозировании урожайности картофеля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований и Брестского областного исполнительного комитета (грант «БРФФИ–Брест–06»)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Статистический ежегодник. Брестская область. – Брест, 2007. – 370 с.

A.A. Volchek, N.N. Shpendik. Modeling of Productivity of the Potato in Territory of the Brest Region

The results of researches of productivity of potatoes in the Brest region are presented in the article. Long-term fluctuations of productivity from 1954 till 2006 are described. The influence of various factors on productivity of agricultural crops is considered. The interrelation between productivity and climatic parameters (temperature of air, average deposits, humidity of a 50 sm layer of ground) is analyzed. A weather component of productivity of potatoes is described by means of regression analysis. The maximal background productivity is received by using the equations constructed for each area. The map of the maximal background productivity of Brest area is drawn on the basis of these data. The estimation of influence of climate change on productivity of potatoes is given. In connection with this the rated period has been broken into two intervals: 1960 to 1984 and from 1985 to 2001 for which regression models are constructed