

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2022. № 4(69). С. 15–22.

Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philipov. 2022;4(69):15–22.

Научная статья

УДК 63:551.5

doi: 10.34655/bgsha.2022.69.4.002

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ

Олеся Игоревна Пищимко^{1,2}, Людмила Вячеславовна Гарафутдинова³

¹ Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия

² Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

³ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Россия

^{1,2} pishchimko@sibnigmi.ru

³ lv.garafutdinova@mail.ru

Аннотация. В статье проведен анализ динамики урожайности картофеля по сельхозпредприятиям и всем категориям хозяйств на территории Иркутской области. Проведен анализ и оценка основных факторов, влияющих на точность прогнозирования урожайности: осадки, дефицит насыщения воздуха, температура, комплексные показатели. Для прогнозирования урожайности были использованы данные за период с 1981 по 2020 г. Установлено, что наибольшее влияние на формирование урожайности картофеля на рассматриваемой территории оказывают условия тепло- и влагообеспеченности. Исследования фаз развития картофеля показывают, что критическим по требовательности растений к метеорологическим условиям является период клубнеобразования. Разработаны физико-статистические модели, вошедшие в автоматизированную технологию прогнозирования урожайности картофеля по сельхозпредприятиям и по всем категориям хозяйств Иркутской области, основанные на использовании сложившихся агрометеорологических условий и фактическом состоянии растений. При помощи критерия Стьюдента проведена оценка значимости коэффициентов корреляции. Базовым показателем является рабочий процесс, подчеркивающий правильность и модульность. Это позволяет заблаговременно прогнозировать урожайность и валовой сбор картофеля. На основе независимой выборки проведена оценка успешности моделей, средняя величина относительной ошибки составляет по всем категориям хозяйств 4,1%, по сельскохозяйственным предприятиям – 8,5%. Анализ результатов на основе авторских испытаний показал достаточно высокую оправдываемость, которая составляет 95,9 и 91,5% соответственно. Разработанная автоматизированная технология передана на оперативные испытания в отдел агрометпрогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Иркутское УГМС».

Ключевые слова: картофель, физико-статистическое моделирование, прогноз урожайности, продовольственная безопасность, агрометеорология.

POTATO YIELD FORECASTING

Olesya I. Pishchimko^{1,2}, Lyudmila V. Garafutdinova³¹ Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia² Siberian Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russia³ Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia^{1,2}pishchimko@sibnigmi.ru³lv.garafutdinova@mail.ru

Abstract. *The article provides an analysis of the dynamics of potato yields by agricultural enterprises and all categories of farms within the Irkutsk region. The analysis and evaluation of the main factors affecting the accuracy of the yield forecasting such as precipitation, lack of air saturation, temperature and complex indicators were carried. To predict yields data from 1981 to 2020 were used. It was found out that heat and moisture supply has the greatest influence on the formation of potato yields in the territory under the research. Studies of the potato development showed that the stage of tuber formation is the crucial one dependent on meteorological conditions. Physical and statistical models have been developed that are included in the computer-aided technology for forecasting potato yields for agricultural enterprises and for all categories of farms in the Irkutsk region. This technology is based on the use of the prevailing agrometeorological conditions and the actual state of plants. Using the Student's t-test, the significance of the correlation coefficients was assessed. The basic indicator is a workflow that emphasizes accuracy and modularity. This allows forecasting the yield and gross yield of potatoes in advance. Based on independent samples the success of the models was assessed, the average relative error for all categories of farms is 4.1%, for agricultural enterprises 8.5%. Analysis of the results based on the authors' tests showed a fairly high accuracy, that is 95.9% and 91.5%, respectively. The developed computer-aided technology was transferred for operational testing to the Department of Agrometeorological Forecasts and Agrometeorology of the Federal State Budgetary Institution "Irkutsk WCEMS".*

Keywords: potato, physical-statistical modeling, yield forecast, food security, agrometeorology.

Введение. Прогнозирование урожайности является важной, но в то же время сложной проблемой, необходимой для устойчивой интенсификации и эффективного использования природных ресурсов [1, 2]. На урожайность сельскохозяйственных культур, в данном случае картофеля, влияют многие параметры, такие как условия окружающей среды, без которых трудно построить надежную модель [3].

На территории Иркутской области картофель является ценной и востребованной культурой. Его используют как продовольственную, кормовую, так и техническую культуру. Картофель выращивают практически на всей территории области. Исследования многолетней динамики урожайности картофеля в регионе представляют значительный интерес для ведения экономической политики Иркутской обла-

сти. Благодаря заблаговременному прогнозированию урожая принимаются решения по обеспечению импортозамещения и продовольственной безопасности региона.

Климат исследуемой области умеренный, резко континентальный, обусловлен орографией и географическим положением. Зима затяжная, морозная. Погодные условия не стабильны, особенно амплитуда изменчивости температур, что оказывает существенное влияние на формирование урожаев сельскохозяйственных культур. Для своевременного прогнозирования урожайности картофеля необходима современная технология, которая включает в себя условия погоды и валовой сбор [4].

В настоящее время многие авторы достигли успехов в агрометеорологичес-

ком прогнозировании урожайности, исследованиях процесса вегетации и установлении корреляционных связей с абиотическими и биотическими факторами формирования урожайности сельскохозяйственных культур [5, 6]. В большинстве случаев для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в основе лежат четыре параметра: 1. полевые исследования; 2. модели роста и развития сельскохозяйственных культур; 3. дистанционное зондирование Земли; 4. статистические модели [7].

Целью работы является создание новой технологии прогнозирования картофеля, включающей ряд физико-статистических моделей, которая позволит повысить точность агрометеорологического прогноза, упростить и ускорить получение результатов, что улучшит качество агрометеорологического обеспечения региона.

Условия и методы исследования. При формировании моделей прогнозирования урожайности картофеля и проведении исследований по сельскохозяйственным предприятиям и всем категориям хозяйств были сформированы базы данных в программе Microsoft Excel. Данные для формирования баз предоставлялись ФГБУ «Иркутское УГМС» отделом агрометеорологических прогнозов и агрометеорологии. Выборка данных производилась из агрометеорологических ежегодни-

ков. Было выбрано 20 репрезентативно расположенных метеостанций наземной сети: Качуг, Киренск, Залари, Усть-Илимск, Новожилино, Худоеланское, Железногорск, Тангуй, Тайшет, Тулун, Куйтун, Кутулик, Новонкутск, Бохан, Зима, Оса, Черемхово, Новочунка, Хомутово и Усть-Ордынский. Метеостанции в совокупности наиболее информативно отражают агрометеорологию Иркутской области.

Собраны, сформированы и проанализированы данные урожайности картофеля за период с 1981 по 2020 год (табл. 1). Минимальная урожайность по сельскохозяйственным предприятиям составила 63 ц/га, тогда как максимальная достигла 195 ц/га, что в три раза превышает минимальную. Неоднородная степень рассеивания подтверждается коэффициентом вариации значений урожайности и равна 34% урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям. Урожайность картофеля по всем категориям хозяйств проявляется большей стабильностью. Минимальное значение урожайности составляет 82 ц/га, максимальное – 186 ц/га соответственно. Коэффициент вариации по урожайности картофеля по всем категориям хозяйств – 13%, что говорит о средней степени рассеивания данных и более стабильной динамике ряда [8].

Таблица 1 – Характеристики урожайности картофеля (1981-2020 годы), (ц/га)

	Картофель по сельхозпредприятиям	Картофель по всем категориям хозяйств
Средняя	121,8	138,1
Максимальная	195,00	186,00
Минимальная	63,00	82,00
Коэффициент вариации(%)	34	13
Стандартное отклонение	40,94	18,50

Как известно, процесс формирования урожая является интегральным и зависит от гидротермических показателей, света, элементов питания, семенного материала и т.д. [9, 10]. Анализ многолетней динамики урожайности и метеорологических

факторов показал, что лимитирующими факторами для исследуемой территории выступают тепло и влага, поэтому прогноз урожая чаще всего основывается на количественных зависимостях урожайности с гидротермическими показателями.

Картофель в процессе вегетации в зависимости от фенологической фазы своего развития по-разному нуждается в тех или иных факторах среды [9]. Например, для роста ботвы оптимальна температура 19-21 °С, а клубнеобразование лучше проходит при 16-18 °С. Рост клубней замедляется при переходе среднесуточной температуры выше 20-25 °С, а при увеличении температуры до 30 °С и более прирост клубней прекращается. Следовательно, израстание клубней картофеля происходит из-за чередования жарких и холодных периодов. По биологическим особенностям картофель относится к культурам с переменной засухоустойчивостью [11].

В мае связи урожайности картофеля со всеми метеорологическими предикторами в большей степени невысокие. Наиболее высокие коэффициенты корреляции урожайности с метеорологическими факторами получены в июле (период клубнеобразования).

Большую информативность имеют комплексные показатели, которые отражают как термический режим, так и условия увлажнения [6, 12]. В прогнозировании урожайности картофеля в качестве основных агрометеорологических факторов использовался гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова с мая по июль. При сопоставлении ГТК с урожайностью оказалось, что в целом неблагоприятные агрометеорологические условия, влияющие на снижающие урожайности картофеля, складываются при низких значениях ГТК за май – июль, т. е. при возникновении засушливых явлений. В годы, когда за май – июль ГТК равен 0,8 и выше, влагообеспеченность бывает достаточной, урожайность картофеля, как правило, выше линии тренда.

Срок составления агрометеорологического прогнозирования урожайности картофеля, установленный Росгидрометом, приходится на 1-2 августа.

Результаты исследований. Физико-статистические модели хорошо зарекомендовали себя на практике благодаря простоте расчетов, удобству их примене-

ния и приемлемой во многих случаях успешности прогнозов [4, 13, 8].

Наиболее трудоемким и плохо поддается формализации начальный этап, состоящий в том, что для определенной культуры, территории и заблаговременности прогноза изучаются условия роста и формирования урожая. Затем составляется список вероятных факторов, оказывающих влияние на формирование урожайности, в соответствии с ними отбираются данные. При помощи баз данных, сформированных в Microsoft Excel, рассчитываются корреляционные матрицы, отражающие зависимость факторов между собой и урожайностью. Отобранные факторы служат материалом для получения уравнений регрессии различной степени сложности.

При формировании моделей прогноза урожайности, фазы вегетации картофеля определяют выбор агрометеорологических параметров и интервалов их временного суммирования. Для поиска параметров физико-статистических моделей использовался метод наименьших квадратов, среда программирования MATLAB. Для оценки значимости коэффициентов корреляции и однофакторных и многофакторных моделей применялся критерий Стьюдента. Выборка проверялась на однородность в программе STATISTIKA. Выборочные значения критерия t_R^* , рассчитывались по формулам и сравнивались с $t_{кр}(\alpha; \nu)$ из таблицы [14], где уровень значимости α принимался равным 5%, а число степеней свободы $\nu = N - m - 1$, где $N = 41$ – длина выборки, m – число независимых переменных.

При формировании моделей в качестве независимых параметров подбирались агрометеорологические данные с разными интервалами осреднения, температура (временной интервал IV - VII), дефицит насыщения воздуха (временной интервал IV - VII) и осадки (временной интервал I - VII).

На основании учета основных факторов и статистической обработки был получен ряд моделей (табл. 2), позволяющий

прогнозировать урожайность картофеля по всем категориям хозяйств и по сель-

хозпредприятиям на территории Иркутской области.

Таблица 2 – Физико-статистические модели для прогноза урожайности картофеля по Иркутской области

Но- мер моде- ли	Срок составления прогноза	Вид модели	Коэффициент детермина- ции (R)	Ошибка модели (\pm S_y), ц/га
По всем категориям хозяйств				
1	1-2 августа	$Y = 155,69 - 26,43 \text{ ГТК}(V - VII) + 0,776n$	0,59	5,6
2	1-2 августа	$Y = 20,572 + 8,05T (V - VII) - 0,063 \text{ ОС}(X - VII) + 0,5117 n$	0,63	6,1
3	1-2 августа	$Y = 7,83 + 13,4 D (VI-VII) + 0,136 \text{ ОС}(V - VII) + 0,296 n$	0,70	6,0
По сельскохозяйственным предприятиям				
1	1-2 августа	$Y = 43,820 + 12,963 \text{ ГТК}(V - VII) + 3,148 n$	0,85	-13,8
2	1-2 августа	$Y = 0,473 + 2,122 D (VI - VII) + 0,175 \text{ ОС}(X - VII) + 2,911 n$	0,86	-11,0
3	1-2 августа	$Y = 5,429 + 2,314 T (V - VII) + 0,153 \text{ ОС}(V - VII) + 2,974 n$	0,86	-15,3

Примечание: Y – урожайность картофеля, ц/га;

ОС(VII) – сумма осадков за периоды, мм (римскими цифрами в индексе указан месяц);

T (VII) – среднесуточная температура воздуха за периоды, С;

D(VII) – среднесуточный дефицит насыщения воздуха за периоды, гПа;

ГТК (V - VII) – гидротермический коэффициент Селянинова:

$$\text{ГТК}(V - VII) = \frac{\text{ОС}(V - VII)}{0,1 \sum T(V - VII)}$$

n – порядковый номер года (1981 год принят за 1).

Успешность методов оценивалась согласно руководящему документу «Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов» РД 52.27.284-91 [12].

Средняя величина относительной ошибки методических прогнозов урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на срок с 1-2 августа составила 4,1%. Средняя ошибка методических прогнозов урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям на территории Иркутской области составила 8,5%. Средние ошибки инерционного и климатологического прогнозов по картофе-

лю по всем категориям хозяйств составили 2,5 и 2,1 % соответственно, что незначительно ниже относительной ошибки методического прогноза по сельскохозяйственным предприятиям – 15 и 12,7 % соответственно, что выше ошибок методических прогнозов.

Оценка оправдываемости составленных прогнозов по новому методу по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$) позволила выявить число оправдавшихся прогнозов (табл. 3). По территории Иркутской области все методические прогнозы картофеля по всем категориям хозяйств и по сельскохозяйственным предприятиям оправдались.

Таблица 3 – Средняя оправдываемость прогнозов за 2017-2019 годы по территории Иркутской области (по величине относительной ошибки)

Район	Заблаговременность	№ модели	Методические	Инерционные	Климатологические
По всем категориям хозяйств	1-2 августа	1	96,7	97,5	97,9
		2	96,6	97,5	97,9
		3	95,9	97,5	97,9
По сельскохозяйственным предприятиям	1-2 августа	1	93,3	85	87,3
		2	93,4	85	87,3
		3	91,5	85	87,3

Полученные модели вошли в автоматизированную технологию расчета урожайности картофеля, созданную в программе Microsoft Excel, которая позволяет ежегодно производить расчет прогноза урожайности картофеля. Прогнозист вносит в вводную форму агрометеорологические параметры, и расчет происходит автоматически, выдавая в результате прогноз урожайности, прогноз валового сбора и оценку методического прогноза согласно [13].

Заключение. Исходя из полученного анализа, наибольшее влияние на формирование урожайности картофеля на рассматриваемой территории оказывают условия тепло- и влагообеспеченности. Наиболее важен период клубнеобразования, который является критическим по требовательности растений к метеорологическим условиям.

Средняя величина относительной ошибки методических прогнозов урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на срок 1-2 августа составила 4,1%, по сельскохозяйственным предприятиям – 8,5 %, что значительно выше общепринятого порога успешности.

Таким образом, на основании результатов проведенных вычислительных экспериментов продемонстрирована возможность прогнозирования урожайности картофеля при помощи агрометеорологической информации и многолетних данных об урожайности картофеля по всем категориям хозяйств и сельскохозяйственным предприятиям.

Список источников

1. Phalan B., Green R., Balmford A. Closing yield gaps: perils and possibilities for biodiversity conservation // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014. Volume. 369. № 1639.
2. Tilman D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proc. of the National academy of Sciences*. 2011. Vol.108. № 50.
3. Волчек А.А., Мешик О.П., Волчек А.А. Прогнозирование урожайности картофеля на примере Брестской области // *Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий*. 2018. С. 55-62. EDN: YWCSWQ.
4. Старостина Т.В, Пищимко О.И., Пищимко В.В. Автоматизированная технология прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области // *Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института*. 2021. № 107. С. 92-99. doi: 10.55235/0320359X_2021_107_92. EDN: LFCIUU.
5. Лапишинов Н.А. Влияние температурного режима в период вегетации на урожайность картофеля // *Достижения науки и техники АПК*. 2009. № 4. С. 33-34. EDN: LTZHMZ.
6. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1928. № 20. С. 169-178.
7. Schnepf R. NASS and US crop production forecasts: Methods and issues // *Congressional Research Service (CRS) Report*. 2017.
8. Старостина Т.В., Кононенко С.М., Гусарова Т.Ю. Результаты испытания методов

прогноза урожайности картофеля, многолетних и однолетних трав по Омской области // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2019. № 46. С. 56-59. EDN: ASPATX.

9. Пасько О.А. Зависимость урожайности картофеля от погодных условий // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1(178). С. 56-61. doi: 10.36718/1819-4036-2022-1-56-61. EDN: XALJFN.

10. Экономика сельского хозяйства: практикум [М.Н. Малыш и др.]: учебник для вузов. СПб.: Изд-во "Лань", 2004. 223 с.

11. Кушнарев А.Г. Физиология засухоустойчивости картофеля в сухостепных агроландшафтах Забайкалья // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2008. № 1(10). С. 56-59. EDN: KGXKDR.

12. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. СПб.: Изд-во «Гидрометеиздат», 1991. 150 с.

13. Камышенко Г.А. Климатическая составляющая в изменении урожайности картофеля // Природопользование. 2014. № 25. С. 39-46. EDN: QRHXCA.

14. Кононенко С.М., Старостина Т.В. Совместное использование спутниковой и наземной метеорологической информации для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. С. 28-33. EDN: YOYIEZ.

References

1. Phalan B., Green R., Balmford A. Closing yield gaps: perils and possibilities for biodiversity conservation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014;Vol. 369.1639.

2. Tilman D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2011;108(50).

3. Volchek A.A., Meshik O.P., Volchek A.A. Prediction of potato productivity on the example of the Brest region. 2018;55-62 (In Russ.)

4. Starostina T.V., Pishchimko O.I., Pishchimko V.V. Automated method of physical and statistical forecasting of spring wheat yield in the Kemerovo region. *Труды СибНИГМИ*. 2021;107:92-99 (In Russ.)

5. Lapshinov N.A., Influence of the temperature mode during vegetation on productivity of the potato. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2009;4:33-34 (In Russ.)

6. Selianinov G.T. O selskohoziastvennoi ocenke klimata [Selyaninov G.T. About Agricultural Climate Assessment]. *Труды по сelskohoziastvennoi meteorologii*. 1928;20:169-178 (In Russ.)

7. Schnepf R. NASS and US crop production forecasts: Methods and issues. *Congressional Research Service (CRS) Report*. 2017.

8. Starostina T.V., Kononenko S.M., Gusarova T.U. Rezyltati ispitania metodov prognoza yrozainosti kartofelia, mnogoletnih i odnoletnih trav po Omskoi oblasti [Results of testing methods for predicting the yield of potatoes, perennial and annual grasses in the Omsk region]. *Rezyltati ispitania novih i ysovershenstvovannih tehnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. 2019;46:56-59 (In Russ.)

9. Pasko O.A. Potato yield dependence on weather conditions. *Bulletin of KSAU*. 2022;1(178):56-61 (In Russ.)

10. Ekonomika selskogo hoziastva: Praktikum M.N. Malish i dr. [Agricultural Economics: Workshop]. *Sankt-Peterburg: Lan*. 2004;223 (In Russ.)

11. Kushnarev A.G. Fiziologiya zasuxo-ustoichivosti kartofelia v suxostepnix agrolandshaftax Zabaikalia [Physiology of potato drought resistance in dry-steppe agricultural landscapes of Transbaikalia]. *Vestnik of Buryat State Academy of . Agriculture named after V. Philippov*. 2008;1(10):56-59 (In Russ.)

12. Metodicheskie ukazania po provedeniu proizvodstvennih (operativnih) ispitaniy novih i ysovershenstvovannih metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov [Guidelines for conducting production (operational) testing of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts]. *Sankt-Peterburg. Gidrometeoizdat*. 1991;150 (In Russ.)

13. Kamysheiko G.A. Climatic contain in potato yields changing. *Природопользование*. 2014;25:39-46 (In Russ.)

14. Kononenko S.M., Starostina T.V. Joint use of satellite and ground-based meteorological information for monitoring of agricultural crops. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017*. 2017;28-33 (In Russ.)

Информация об авторах

Олеся Игоревна Пищимко – аспирант, научный сотрудник;

Людмила Вячеславовна Гарафутдинова – аспирант, младший научный сотрудник.

Information about the authors

Olesya I. Pishchimko – graduate student, researcher;

Lyudmila V. Garafutdinova – graduate student, junior researcher.

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 24.11.2022.

The article was submitted 26.09.2022; approved after reviewing 22.11.2022; accepted for publication 24.11.2022.