and 24,28 %, respectively. The lowest protein content (19,73 %) was in the Yuldash pea variety, making it unsuitable for processing into food. The Hangildin Memory variety was the richest in calcium than other varieties, and the Chishminsky 229 variety contained more iron and dietary fibers. The zinc content of all samples was approximately at the

same level. The study of grain microstructure using an electron microscope made it possible to establish that the starch-protein matrix's optimal structure and more homogeneous and small starch granules are characterized by peas of varieties Chishminsky 95, Hangildin Memory, and Lukerya haricot.

© Леонова С.А., Вебер А.Л., Мухаметрахимова Л.Р., Илларионова О.В.

УДК 633.1

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-61-66

Н.Н. Рябова, Н.Ю. Николаева, И.Б. Сорокин

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТА

Ключевые слова: климатические условия; урожайность; зерновые культуры; модель; регрессионный анализ.

Введение. Как известно, неблагоприятные погодные условия в ряде регионов России могут отрицательно сказываться на валовом сборе сельскохозяйственных культур. Несмотря на то, что в мире набирают популярность современные предиктивные технологии [11, 15], позволяющие снизить влияние погодного фактора, их внедрение в отечественном аграрном секторе по разным причинам идёт очень медленно. Наряду с этим глобальные изменения климата заставляют акцентировать внимание на актуальности проблемы мониторинга климатических показателей, статистической обработки этих показателей с целью получения информации, которую можно использовать для разработки и реализации решений устойчивого развития агропромышленного комплекса [2]. Поэтому оценка влияния климата на урожайность культур крайне важна для стратегического прогнозирования сельскохозяйственного производства.

В XXI веке на территории Западной Сибири отмечен рост числа экстремальных климатических явлений (аномальные погодные условия в зимние месяцы, наводнения, ранние осенние и поздние весенние заморозки), что несомненно сказывается на продуктивности агроценозов. Томская область сегодня занимает первое место в Сибири по урожайности зерновых [12], и это несмотря на то, что регион по агрометеорологическим условиям относится к зоне рискованного земледелия, которому свойственно существенное колебание урожайности возделываемых культур. Так, по оценкам экспертов, потери урожая из-за неблагоприятных погодных факторов в Томской области в среднем составляют 10–15 % [7]. Данные обстоятельства обуславливают

постоянное и комплексное изучение влияния климатических ресурсов с целью своевременного принятия мер по улучшению биологического состава почвы и внедрения новых технологий в земледелие для получения максимального урожая. Поэтому выявление агроклиматического потенциала урожайности сельскохозяйственных культур продолжает оставаться значимым.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является оценка влияния климатических переменных на урожайность зерновых культур, возделываемых на почвах агроландшафтов подтаёжной зоны Томской области. Задачи: 1) определение урожайности исследуемых сельскохозяйственных культур; 2) выявление доминирующих факторов среди изучаемых климатических параметров, оказывающих наибольшее влияние на урожай; 3) моделирование урожайности культур с помощью множественной нелинейной регрессии.

Материалы и методики исследования. Источником данных урожайности сельскохозяйственных культур, таких как овёс и яровая пшеница, послужили материалы полевых работ, проводимых на полях КФХ «Зинцов» и ООО «Агрофирма «Межениновская» Шегарского района, ООО «Сибирское зерно», ОГБОУ СПО «Томского аграрного колледжа» и ООО «Перовское» Томского района. Почвы всех опытных полей – серые оподзоленные тяжелосуглинистые, характеризующиеся слабой гумусированностью ($2,96 \pm 0,36$ %), средне- и слабокислой реакцией среды, содержание нитратного азота очень низкое ($5 \pm 0,85$ мг/кг), подвижного фосфора – высокое (134 ± 14 мг/кг), обменного калия – среднее (109 ± 5 мг/кг) [8, 9]. Учёт урожая

зерновых культур проводили методом сплошной уборки учётной площади.

Массив климатических показателей за период с 2001 по 2015 гг. был получен по данным Государственного фонда Гидрометеоцентра [10] относительно метеостанций, ближайших к изучаемым объектам. Использовались следующие параметры климата за вегетационный период с апреля по сентябрь: сумма активных температур выше 10 °C (ΣT), °C; сумма осадков (X), мм; продолжительность солнечного сияния (N), час. Дополнительно привлекли величины, полученные расчётным путём: суммарная солнечная радиация (Q), Вт/м² [6, 14], фотосинтетическая активная радиация (Q_{ϕ}), Вт/м² [6]; испаряемость (E), мм [3], коэффициент увлажнения (K). Климат Томской области характеризуется как резко континентальный, с суровым продолжительным зимним периодом и коротким тёплым летом, пе-

риод вегетации ограничивается поздними весенними и ранними осенними заморозками.

Статистическая обработка результатов исследований проводилась с помощью пакета StatSoft STATISTICA 10.0 [1].

Результаты исследования и обсуждение. Задача построения моделей зависимости урожая сельскохозяйственных культур выполняется применительно к определённым запросам. Прежде всего, урожайность интересует аграриев с учётом фактора времени. Следовательно, для прогноза производительности культур необходимо использовать аппарат временных рядов. По методу скользящих средних был построен временной ряд урожайности культур с 2001 по 2015 гг., однородность которого подтвердил тест Колмогорова – Смирнова [4] на уровне значимости 0,05. Описательные статистики урожайности культур представлены в таблице 1.

Таблица 1 Описательные статистики урожайности зерновых культур

Культура	Описательная величина урожайности (ц/га)					
	среднее	минимум	максимум	стандартное отклонение	стандартная ошибка	уровень надёжности (95 %)
Яровая пшеница	19,60	8,7	31,45	8,07	1,47	3,01
Овёс	18,51	8,8	26,5	4,84	1,25	2,68
Овёс (сбор соломы)	3,64	2,71	4,56	0,65	0,20	0,47

Для оценки влияния климатических параметров на урожайность использовался метод главных компонент и корреляционный анализ [5]. Последовательности влияния факторов на значения главной компоненты, последовательности уменьшения значений коэффициента кор-

реляции на урожайность и коэффициенты вариации климатических переменных приведены в таблице 2. Наибольшей вариабельностью по годам исследования характеризуется увлажнение ($V = 29\%$), наименьшей – суммарная солнечная радиация ($V = 7\%$).

Таблица 2 Последовательности влияния климатических факторов на урожайность сельскохозяйственных культур

Вид статистического анализа	Культура	Последовательность влияния факторов (по уменьшению влияния)
Метод главных компонент	Яровая пшеница	$\Sigma T, E, N, X, K, Q, Q_{\phi}$
	Овёс	$X, K, \Sigma T, Q, Q_{\phi}, E, N$
	Овёс (сбор соломы)	$X, \Sigma T, K, Q, Q_{\phi}, E, N$
Корреляционный анализ	Культура	Последовательность по уменьшению значений коэффициента корреляции
	Яровая пшеница	$Q, Q_{\phi}, E, N, \Sigma T, K, X$
	Овёс	$X, Q_{\phi}, Q, N, \Sigma T, K, E$
	Овёс (сбор соломы)	$X, K, Q_{\phi}, Q, N, \Sigma T, E$
Коэффициент вариации (по уменьшению значения, %)		$K, X, E, N, \Sigma T, Q_{\phi}, Q$

Из всех проанализированных климатических показателей – сумма активных температур выше 10 °C (ΣT), °C; сумма осадков (X), мм; продолжительность солнечного сияния (N), час; суммарная солнечная радиация (Q), Вт/м²; фотосинтетическая активная радиация (Q_{ϕ}), Вт/м²; испаряемость (E), мм; коэффициент увлажнения (K) – высокая корреляционная зависимость выявлена между такими параметрами, как X и K ; ΣT и E ; Q , Q_{ϕ} и N . Поэтому в уравнения модели

включён только один из этих сильно коррелированных факторов.

Для получения более устойчивых оценок параметров модели выполнили преобразование данных – использовали логарифмированную величину урожайности, поскольку логарифмирование позволяет стабилизировать дисперсию и снижает уровень случайных ошибок [1]. Зависимые факторы – урожайность яровой пшеницы ($Y_{я}$), урожайность овса на сбор соломы ($Y_{ос}$).

Уравнения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур, значения коэффициентов детерминации (R^2), критериев Дарбина-Уотсона (D), коэффициента автокорреляции (r_s) приведены в таблице 3.

Результаты моделирования по культуре овёс дали низкую точность, по этой причине в таблицу не были включены уравнения. В противоположность этому модель зависимости овса на сбор соломы от климата показало статистическую значимость.

По величине коэффициента детерминации R^2 , свидетельствующего о том, какую долю разброса значений урожайности относительно среднего значения объясняет построенная мо-

дель, можно сделать вывод, что достоверность многофакторных моделей выше по сравнению с однофакторной или моделью с двумя исходными параметрами. Следовательно, многомерные модели наиболее точнее описывают процесс аграрного производства.

Для оценки адекватности полученных зависимостей исследовали остатки моделей (разность между исходным значением и значением, вычисленным по построенной модели) визуальным анализом и с помощью критерия Дарбина – Уотсона [2]. На рисунке 1 приведены графики остатков на нормальной вероятностной бумаге по уравнениям многофакторных моделей из таблицы 3.

Таблица 3 Модели зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от климатических параметров

Культура	Модель зависимости однофакторная	R^2	D	r_s
Яровая пшеница	$Y = 710,98 - 0,0312 * Q_{\Phi} + 0,35E^{-6} * Q_{\Phi}^2$	0,64	1,22	0,42
	$Y = 972,47 - 0,948 * \Sigma T + 0,00023 \Sigma T^2$	0,56	1,15	0,47
	$Y = 76,11 - 101,351 * K + 41,234 * K^2$	0,49	0,98	0,60
Овёс (сбор соломы)	$Y = -0,041 + 0,041 * \Sigma T - 1,668E^{-6} * \Sigma T^2$	0,63	1,17	0,36
	$Y = -0,308 + 39,01 * K - 16,982 * K^2$	0,61	1,33	0,51
	$Y = -0,0295 + 0,00187 * Q_{\Phi} - 0,354E^{-7} * Q_{\Phi}^2$	0,65	1,43	0,33
Модель зависимости многофакторная				
Яровая пшеница	$Y = \exp(4,679 + 0,00677 * \Sigma T - 0,00612 * X - 0,00033 * Q_{\Phi})$	0,87	1,51	0,27
Яровая пшеница	$Y = \exp(6,493 + 0,00767 * \Sigma T - 0,00259 * K - 0,00044 * Q_{\Phi})$	0,80	1,53	0,25
Овёс (сбор соломы)	$Y = \exp(5,417 - 0,00821 * \Sigma T + 0,005 * K + 0,00028 * Q_{\Phi})$	0,87	1,49	0,32

Рисунок 1
Графики остатков на нормальной вероятностной бумаге

Нормальный вероятностный график остатков наглядно отражает отсутствие больших отклонений, а также то, что остатки хорошо ло-

жатся на прямые, которые соответствуют нормальному закону. Поэтому предположение о нормальном распределении ошибок выполнено.

Низкие значения коэффициента автокорреляции (r_s), а также величины статистики Дарбина-Уотсона (D), которые по модулю меньше критического значения 1,96, свидетельствуют об отсутствии автокорреляции остатков, следовательно, модель вполне адекватно описывает данные. Дополнительное исследование справедливости

моделей представлен на диаграммах рассеяния значений, предсказанных моделью, и наблюдаемых значений урожайности культур (рисунок 2). Анализ графиков позволяет заключить, что уравнения регрессионных зависимостей достаточно адекватно описывают данные и результаты прогноза.

Рисунок 2

Графики предсказанных и наблюдаемых значений по полученным регрессионным моделям

Построенные регрессионные модели урожайности культуры статистически значимы на 5 % уровне и соответственно могут применяться при рамочных значениях исходных данных, т. е. на интервалах значений, использованных при построении этих моделей. Следует учесть, что факторы погоды оказывают нелинейное воздействие на урожайность, поэтому использование больших интервалов времени для прогнозирования, на которых значительно проявляется нелинейность, приводит к существенным ошибкам.

Выводы. Моделирование средней урожайности зерновых выполнено с использованием данных полевых исследований Томской агрохимической службы, проверенных на однородность по критерию Колмогорова – Смирнова на 5 % уровне. Построенные регрессионные уравнения показали, что 80–87 % разброса значений урожайности яровой пшеницы и овса обусловлены влиянием совместного воздействия погодных условий. Использование метода главных компонент позволило значительно уменьшить число учитываемых климатических факторов, выявить наиболее значимые, которые вошли в

уравнения взаимосвязи продуктивности культур и агроклиматических условий.

Из всех проанализированных климатических показателей – сумма активных температур выше 10 °C (ΣT), °C; сумма осадков (X), мм; продолжительность солнечного сияния (N), час; суммарная солнечная радиация (Q), Вт/м²; фотосинтетическая активная радиация (Q_ϕ), Вт/м²; испаряемость (E), мм; коэффициент увлажнения (K) – высокая корреляционная зависимость выявлена между такими параметрами, как X и K ; ΣT и E ; Q , Q_ϕ и N . Поэтому в уравнения модели включён только один из этих сильно коррелированных факторов.

Анализ статистических критериев определил, что достоверность многофакторных моделей выше по сравнению с однофакторной или моделью с двумя исходными параметрами. На основе оценки остатков моделей погрешность моделей урожайности не превышает 10 %. Модели оценены на значимость по критерию Фишера и могут быть использованы для прогноза урожайности агрокультур.

Количественная взаимосвязь урожайности зерновых культур и климатических показателей необходима для разработки стратегий устойчивого развития конкретных сельскохозяйственных предприятий исследуемой территории. По-

лученная количественная взаимосвязь может служить в качестве одной из основ информации для использования современных технологий программирования урожая.

Библиографический список

1. Боровиков, В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / В. Боровиков; 2-е издание. М., 2003. 688 с.
2. Вуколов, Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов Statistica и Excel [Текст] / Э.А. Вуколов. М.: Форум, 2012. 464 с.
3. Зайков, Б.Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР [Текст] // Тр. ГТИ, вып. 21/75. М.: Гидрометеиздат, 1949. 49 с.
4. Колмогоров, А.Н. Избранные труды. Том 2. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / А.Н. Колмогоров. М.: Наука, 2005. С. 170–176.
5. Ллойд, Э. Справочник по прикладной статистике [Текст] / Э. Ллойд, У. Ледерман. М.: Финансы и статистика, 1989. Том 1. 510 с.
6. Сивков, С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации [Текст] / С.И. Сивков. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 232 с.
7. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России [Текст]. М.: Росгидромет, 2005. 30 с.
8. Сорокин, И.Б. Известкование – один из факторов повышения плодородия почв Томской области [Текст] / И.Б. Сорокин, Е.А. Сиротина // Агрохимический вестник, 2019. Т. 1. № 1. С. 7–10.
9. Чекмарев, П.А. Агроэкологическое состояние пахотных земель Томской области и перспективы применения методов дистанционного зондирования Земли [Текст] / П.А. Чекмарев, И.Б. Сорокин, М.Ю. Катаев // Земледелие. 2017. № 5. С. 7–10.
10. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения 20.11.2019).
11. ИТ в агропромышленном комплексе в мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.tadviser.ru/a/437551 (дата обращения 19.02.2020).
12. Официальный интернет-портал Администрации Томской области [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.tomsk.gov.ru (дата обращения 19.02.2020).
13. Rivington M., Koo J. Report on the meta-analysis of crop modelling for climate change and food security survey. Climate Change, Agriculture and Food Security Challenge Program, Frederiksberg, 2011. P. 174.
14. SMARTS Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html> (дата обращения 19.02.2020).
15. Modern Agriculture and Rural Technology. Department of International Cooperation Ministry of Science and Technology the People's Republic of China, 2015. P. 58. URL: <http://ru.china-embassy.org/rus/kjhz/P020160125605750983784.pdf>.

Сведения об авторах

1. **Рябова Надежда Николаевна**, кандидат биологических наук, доцент кафедры экономики и права, Томский сельскохозяйственный институт-филиал ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, 634050, г. Томск, ул. К. Маркса, 19, тел.: +7 (3822) 53-23-61, e-mail: naryb@vtomske.ru.
2. **Николаева Наталия Юрьевна**, кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой агрономии, технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Томский сельскохозяйственный институт-филиал ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, 634050, г. Томск, ул. К. Маркса, 19, тел.: +7 (3822) 53-23-61, e-mail: agrocafedra@mail.ru.
3. **Сорокин Игорь Борисович**, доктор сельскохозяйственных наук, директор ФГБУ «Станция агрохимической службы «Томская», 634063, г. Томск, ул. Беринга, 12А, тел.: +7 (3822) 90-49-45, e-mail: sastom@mail.ru.

Климат является ключевым стрессовым фактором, влияющим на производство сельскохозяйственных культур в Томской области, так как земледелие в регионе уязвимо для неблаго-

приятных погодных условий и обладает слабой адаптивной способностью. Нами представлены результаты исследования многолетних данных с 2001 по 2015 гг. по климатическим показателям

и валовому сбору яровой пшеницы и овса, возделываемых на серых оподзоленных почвах зоны подтайги Томской области. Анализ корреляционной зависимости позволил выделить последовательность влияния агрометеорологических параметров на урожайность исследуемых культур. С помощью факторного анализа были определены наиболее значимые среди рассматриваемых показателей климата за вегетационный период (апрель – сентябрь), оказывающие воздействие на сельскохозяйственную продуктивность. Посредством множественной нелинейной регрессии построены как однофакторные, так и многофакторные модели зависимости урожайности зерновых от лимитирующих климатических факторов. Предложенные функциональные уравнения достоверно объясняют 80–87 % разброса зависимой переменной. По вели-

чине коэффициента детерминации определено, что надёжность многофакторных моделей выше по сравнению с однофакторной или моделью с двумя исходными параметрами. Всесторонний анализ разностей между исходными значениями и значениями, прогнозируемыми моделью, показал адекватность построенных взаимосвязей. Статистическая значимость регрессионных уравнений подтверждена на 5 % уровне, что позволяет их применить при рамочных значениях исходных данных. Обобщённая оценка моделей свидетельствует, что погрешность моделей урожайности не превышает 10 %. Полученные результаты дают возможность использовать климатические показатели при оценке потенциальных агроэкологических ресурсов исследуемых территорий.

N. Ryabova, N. Nikolaeva, I. Sorokin

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF CEREAL CROP YIELD VARIABILITY DEPENDING ON CLIMATE

Key words: climatic conditions; crop productivity; grain; cereals; model; regression analysis.

Authors' personal details

1. **Nadezhda Ryabova**, Candidate of Biological Sciences, Assistant Professor of the Department of Economics and Law Tomsk Agricultural Institute, Branch of Novosibirsk State Agrarian University, 19, Karl Marx Str., Tomsk, 634050, Russia, phone: +7 (3822) 53-23-61, e-mail: naryb@vtomske.ru.

2. **Nataliya Nikolaeva**, Candidate of Biological Sciences, Assistant Professor, Head of the Department of Agronomy, Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Tomsk Agricultural Institute, Branch of Novosibirsk State Agrarian University, 19, Karl Marx Str., Tomsk, 634050, Russia, phone: +7 (3822) 53-23-61, e-mail: agrocafedra@mail.ru.

3. **Igor Sorokin**, Doctor of Agricultural Sciences, Director of the Federal State Budget Institution «Tomsk Agrochemical Service Station», 12A, Bering Str., Tomsk, 634063, Russia, phone: +7 (3822) 90-49-45, e-mail: sastom@mail.ru.

Climate is the main stress factor that affects crop production in the Tomsk Region because agriculture in the region has low adaptive capacity due to the significant influence of adverse weather conditions. The paper presents the results of a long-term study data from 2001 to 2015 on climatic indicators and the gross yield of spring wheat and oats cultivated on gray podzolic soils in the sub-taiga zone of the Tomsk Region. Correlation analysis revealed the sequence of influence of agrometeorological parameters on the yield of the studied crops. The most significant climate indicators were determined, which affected crop productivity during the growing season (April – September) using factor analysis. Both single-factor and multifactor models of dependence the grain productivity on limiting climatic factors were constructed through multiple non-

linear regression. The proposed functional equations explain 80–87 % of the dependent variable spread. The coefficient of determination was calculated. It showed that multifactor models are higher than a single factor or a model with two initial parameters. A comprehensive analysis of the differences between the initial values and the values predicted by the model showed the adequacy of the constructed relationships. The statistical significance of the regression equations is confirmed at the 5 % level, which allows them to be applied with the source data's frame values. A statistical evaluation of the models indicates that crop yield models' error does not exceed 10 %. The obtained results allow using climatic indicators in assessing potential agroecological resources of the studied areas.

© Рябова Н.Н., Николаева Н.Ю., Сорокин И.Б.