

УДК 633.11:631.559(470.44)(045)

*Е.И. Ормели***ЗАВИСИМОСТЬ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ
ОТ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В САРАТОВСКОМ РЕГИОНЕ**

С использованием многолетних стационарных полевых исследований по фазам развития яровой пшеницы выведено прогностическое уравнение расчета урожайности данной культуры в зависимости от продолжительности вегетационного периода с месячной заблаговременностью. С учетом гидротермических факторов Саратовской области проведен расчет прогностического уравнения множественной функции урожайности яровой пшеницы от суммы осадков за апрель-май, средней температуры воздуха в мае, суммы осадков за июнь, суммы осадков за июль, продолжительности вегетационного периода.

Ключевые слова: урожайность, яровая пшеница, гидротермические условия, продолжительность вегетационного периода, корреляция.

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-467-473

Саратовская область является одним из крупнейших регионов России по производству сельскохозяйственной продукции, в частности высококачественных сортов сильных и твердых пшениц. Климатические условия и физико-географическое положение региона позволяют возделывать большое разнообразие зерновых культур – от ранних яровых и озимых зерновых до поздних теплолюбивых.

На устойчивое развитие аграрного сектора региона большое влияние оказывают погодные условия: недостаточное увлажнение территории и частая повторяемость засушливых явлений приводят к резким колебаниям урожайности и валового сбора зерна. Поэтому основными и главными задачами развития отрасли растениеводства являются увеличение продуктивности возделываемых культур и их качества, а также минимизация зависимости от складывающихся погодных условий. Достичь этого возможно путем совершенствования научно-обоснованной системы земледелия и применения ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Заблаговременное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур позволяет планировать работы хлебоприемных предприятий, транспортировку и хранение зерна, предпродажную подготовку, учитывать затраты на рекламу, рассчитать возможные объемы экспорта.

В условиях засушливого климата нашей области значительные посевные площади заняты под озимыми культурами – более 1,2 млн га, обеспечивающими стабильные сборы урожая. По урожайности озимые превосходят яровые зерновые культуры благодаря основной биологической особенности – длительного вегетационного периода, за счет этого они более полно используют приходящую солнечную радиацию и гидротермические условия.

Наиболее перспективной и ценной культурой региона является яровая пшеница. Посевные площади под данной культурой составляют около 600 тыс. га. Средняя урожайность яровой пшеницы по области – 1,2-1,4 т/га [1].

Посев яровой пшеницы в регионе проводят в третьей декаде апреля, при переходе температуры воздуха через плюс 8–10 °С, когда поспевает почва. Посевные работы необходимо проводить в ранние сроки, опоздание со сроком сева на 10 и более дней приводит к снижению урожайности до 30% и выше. Медленное развитие яровой пшеницы в начале вегетации делает ее более уязвимой и сильно подверженной неблагоприятным условиям [2].

Главным лимитирующим фактором практически на всех этапах развития культуры является увлажнение. Наибольшая потребность у яровой пшеницы во влаге наблюдается в фазы кушение, выход в трубку, молочная спелость и составляет до 90 % от общего количества потребляемой влаги.

Большую и значимую роль в жизненном цикле растений играет продолжительность вегетационного периода, которая варьируется по годам в зависимости от сложившихся агрометеорологических условий конкретного года. Жаркие погодные условия приводят к более быстрому созреванию яровой пшеницы, дождливые условия удлиняют межфазные периоды и созревание культуры наблюдается позже обычных сроков [3].

В данной работе представлены результаты расчетов зависимости урожайности яровой пшеницы от продолжительности вегетационного периода и гидротермических условий в Саратовском регионе.

Материалы и методы исследований

В качестве исходных данных использовались метеорологические результаты наблюдений по станции Саратов ЮВ за период 1941–2020 гг., взятые в ФГБУ «Приволжского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» г. Самары. Исследования продолжительности фаз развития и урожайности яровой пшеницы проводились на многолетних стационарных полевых наблюдениях отдела земледелия и агротехнологий ФГБНУ НИИ Сельского Хозяйства Юго-Востока (1972–2005 гг.).

В работе использованы современные программные средства. Широко применялись методы статистической обработки, корреляционного и регрессионного анализа. Оценка достоверности результатов проводилась с помощью критериев Стьюдента, Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена корреляционная диаграмма для урожайности яровой пшеницы (т/га) от продолжительности вегетационного периода (дни) за 1972–2005 гг.

По этим данным была построена модель линейной регрессии, имеющая вид:

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где x – продолжительность вегетационного периода (дни), а y – урожайность яровой пшеницы (т/га). Параметры модели a и b были найдены методом наименьших квадратов. При этом использовалась компьютерная программа DLINTREND, позволяющая найти значения параметров, обеспечивающих минимум суммы квадратов остаточных отклонений

$$\Delta y_i = y_i - ax_i - b, \quad (2)$$

где x_i и y_i – значения переменных, $i = 1, 2, \dots, n$, а $n = 34$ – объем выборки – достаточен для получения уверенных статистических выводов. Программа рассчитывает также оценки среднеквадратичных погрешностей параметров S_a и S_b . Оптимальные значения параметров модели оказались равными:

$$a = 0,037 \pm 0,014 \quad (\text{т/га/дни}),$$

$$b = -2,1 \pm 1,4 \quad (\text{т/га}).$$

Построенная с этими параметрами регрессия показана сплошной линией на рис. 1.

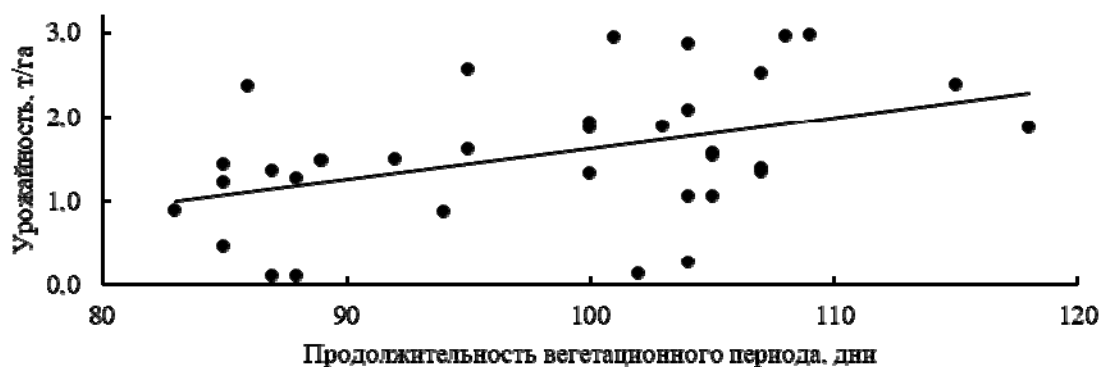


Рис. 1. Корреляционная зависимость урожайности яровой пшеницы (т/га) от продолжительности вегетационного периода (дни) за 1972–2005 гг.

Для найденных значений a и S_a применение выражения (3)

$$t_k = \frac{a}{S_a} \quad (3)$$

дает $t_k = 2,64$. При имеющемся числе степеней свободы $k = 32$ ($k = n - 2$) и уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Стьюдента равно $t_{cr} = 2,04$. Поскольку $t_k > t_{cr}$, то гипотеза об отсутствии связи между переменными x и y отвергается с вероятностью 0,95 и можно использовать альтернативную гипотезу о наличии линейной связи.

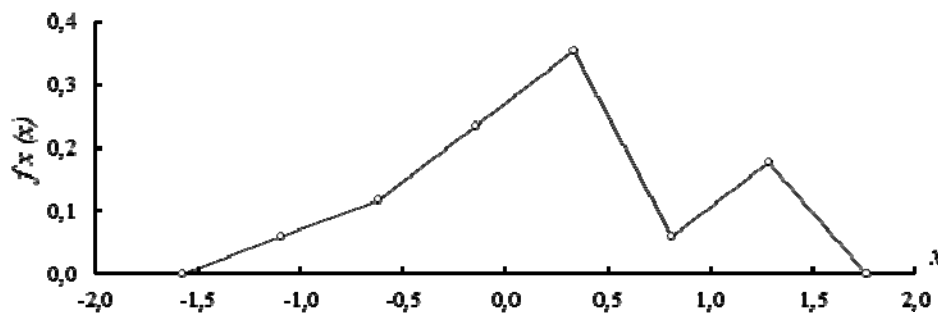


Рис. 2. Полигон выборочных частот для оценки плотности вероятности значений случайной величины Δy_i

Полученные оценки основных характеристик распределения остаточных отклонений (2) оказались равными: среднее значение $0,00 \pm 0,13$ (т/га), среднеквадратичное отклонение $0,749 \pm 0,091$ (т/га), асимметрия $-0,12 \pm 0,38$ и эксцесс $-0,55 \pm 0,68$. Для оценки плотности вероятности значений случайной величины Δy_i построен полигон выборочных частот, показанный на рис. 2. Число градаций гистограммы частот и полигона m принято считать равным 6. Вид полигона качественно согласуется с предположением о нормальности распределения остаточных отклонений. В пределах оцененных погрешностей асимметрия и эксцесс допускают нулевые значения, присущие нормальному распределению.

Для анализа возможности совпадения распределения остаточных отклонений Δy_i с нормальным распределением также использовался критерий Колмогорова – Смирнова. Модуль максимального отклонения эмпирического распределения от теоретического оказался равным $D = 0,107$, а значение параметра Колмогорова $\lambda = D\sqrt{n} = 0,622$. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение параметра равно $\lambda_{cr} = 1,194$. Поскольку, $\lambda < \lambda_{cr}$ гипотеза о согласии распределения остаточных отклонений Δy_i с нормальным, имеющим математическое ожидание $0,00$ т/га и среднеквадратичное отклонение $0,749$ т/га, не может быть отвергнута.

Таким образом, использованные статистические тесты свидетельствуют об адекватности модели (1) с оцененными значениями параметров a и b для описания связи урожайности яровой пшеницы с продолжительностью вегетационного периода. Оправдываемость полученного уравнения составляет 62 %.

По выведенному уравнению регрессии отклонения прогностической урожайности от фактической изменяются от $0,02$ до $1,28$ т/га. Это говорит о том, что при прогнозировании урожайности необходимо учитывать также и метеорологические особенности межфазных периодов.

Для повышения точности предсказания урожайности яровой пшеницы желательно включить в модель метеорологические параметры, способные повлиять на урожайность. Для создания модели применили множественную линейную регрессию со следующим набором параметров: x_1 – сумма осадков за апрель-май (мм), x_2 – средняя температура мая ($^{\circ}\text{C}$), x_3 – сумма осадков за июнь (мм), x_4 – сумма осадков за июль (мм), x_5 – продолжительность вегетационного периода (дни). Значения данных параметров приведены в таблице.

В общем случае модель множественной линейной регрессии предполагает наличие свободного члена. В нашем случае при равенстве нулю всех параметров, урожайность также будет равна нулю, поэтому в дальнейшем свободный член не используется.

С применением компьютерного приложения STATISTICA (версия 8.0) методом наименьших квадратов были получены коэффициенты уравнения регрессии, имеющие вид:

$$y = 0,009714 x_1 - 0,007531 x_2 + 0,008433 x_3 + 0,007070 x_4 + 0,002220 x_5,$$

где y – модельное значение урожайности яровой пшеницы (т/га).

Знаки коэффициентов регрессии не противоречат известным агрометеорологическим положениям. Отрицательное значение коэффициента при среднемесячной температуре воздуха x_2 в мае говорит о частой повторяемости засушливых явлений в данный период на территории нашей области, что отрицательно сказывается на продуктивности яровой пшеницы. Положительные значения остальных коэффициентов говорят о важности увлажнения во время роста и развития данной культуры, а также оптимальной продолжительности вегетационного периода.

**Основные метеорологические параметры по станции Саратов ЮВ (1972-2005 гг.),
продолжительность вегетационного периода (дни) и урожайность яровой пшеницы (т/га)**

Годы	Сумма осадков за апрель-май (мм)	Средняя температура воздуха в мае (°С)	Сумма осадков за июнь (мм)	Сумма осадков за июль (мм)	Продолжительность вегетационного периода (дни)	Урожайность яровой пшеницы (т/га)
1972	56,7	16,4	13,9	7,5	87	0,1
1973	104,2	16,1	29,7	36,6	101	2,94
1974	125,8	15,2	92,0	30,1	95	1,61
1975	11,4	19,3	22,2	89,2	83	0,89
1976	56,3	14,4	125,5	52,4	107	2,51
1977	93,3	18,6	51,1	38,3	100	1,32
1978	87,0	13,0	68,6	35,1	108	2,95
1979	53,2	19,9	16,4	61,0	88	1,26
1980	56,5	14,2	30,5	21,8	89	1,47
1981	53,1	14,5	35,8	34,3	85	1,21
1982	85,0	14,8	66,1	37,1	95	2,56
1983	118,3	15,6	19,5	23,2	107	1,38
1984	9,3	20,1	44,3	77,2	104	0,26
1985	34,3	16,7	158,1	21,2	115	2,38
1986	39,5	14,3	46,0	17,6	100	1,87
1987	41,2	16,7	35,0	121,4	86	2,37
1988	110,5	15,0	12,2	25,6	87	1,35
1989	118,8	14,1	82,2	52,4	105	1,56
1990	91,7	14,0	59,0	101,2	118	1,87
1991	66,8	16,8	38,5	24,1	92	1,48
1992	50,7	13,6	47,5	100,3	103	1,88
1993	59,3	16,5	37,8	146,4	100	1,93
1994	91,6	18,6	66,8	25,5	107	1,33
1995	38,8	17,7	46,6	17,6	85	0,46
1996	61,7	21,9	27,9	30,0	85	1,43
1997	141,8	14,8	29,6	73,5	109	2,97
1998	47,2	16,1	5,0	33,6	88	0,1
1999	40,8	12,4	19,2	29,8	102	0,12
2000	88,2	11,4	128,4	61,8	104	1,05
2001	86,8	15,2	68,0	3,0	104	2,07
2002	63,6	13,1	39,7	21,5	105	1,05
2003	56,5	17,3	103,8	66,4	104	2,86
2004	87,6	14,7	31,4	88,1	105	1,53
2005	75,5	17,9	67,4	19,8	94	0,87

Построенная регрессия показана сплошной линией на рис. 3.

Из рис. 3 и 4 видно, что, используя пять переменных при расчете уравнения линейной регрессии, коэффициент достоверности R^2 увеличился в два раза ($R^2 = 0,3737$) по сравнению с коэффициентом, где использовалась одна переменная ($R^2 = 0,1783$) (рис.4).

Гистограмма отклонений реальной урожайности от модельной приведена на рис. 5, где сплошной линией показано нормальное распределение.

Анализ остаточных отклонений урожайности от модели множественной линейной регрессии с пятью параметрами показывает, что гипотеза их нормального распределения со средним значением 0,00 и среднеквадратичным отклонением 0,65 не может быть отвергнута как по критерию Колмогорова – Смирнова ($d = 0,0750$; $P > 0,20$), так и по критерию Лиллиефорса ($P > 0,20$).

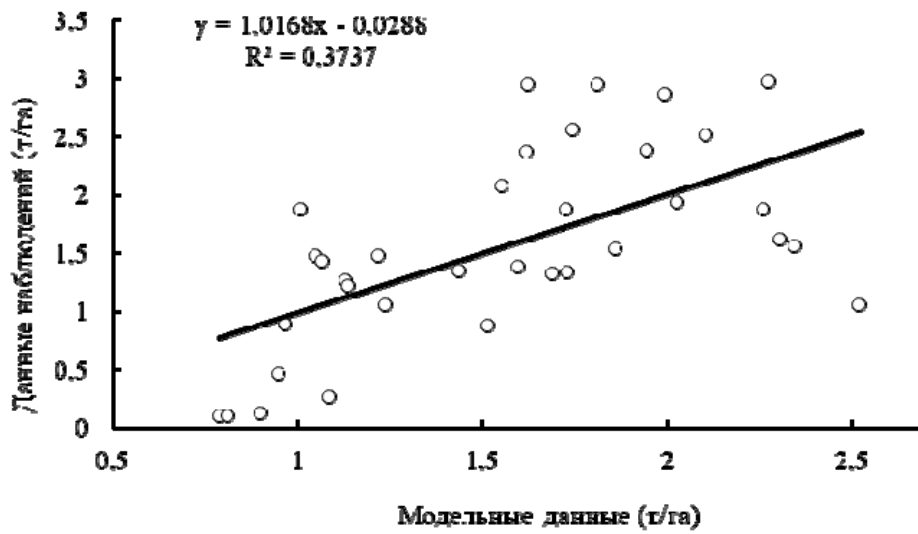


Рис. 3. Результат множественной регрессии для урожайности яровой пшеницы от пяти переменных

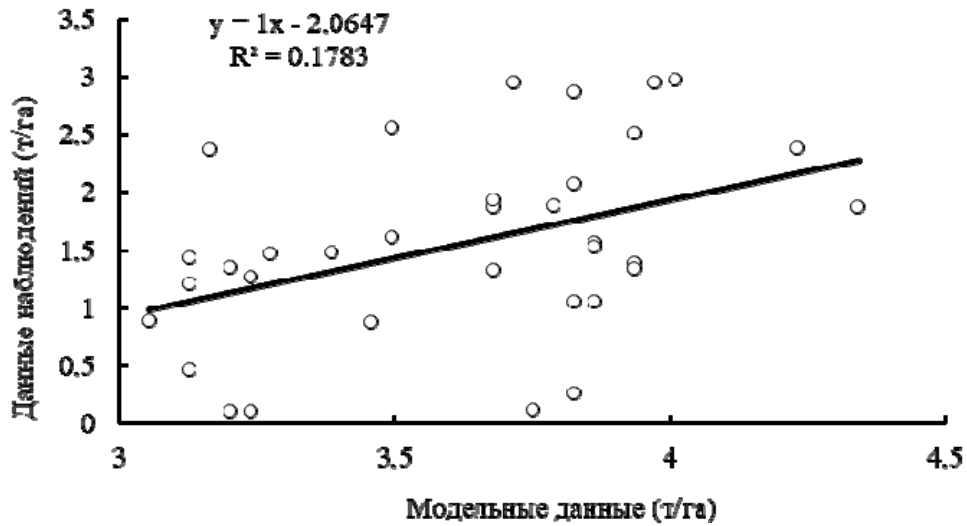


Рис. 4. Результат пошаговой регрессии для урожайности яровой пшеницы (только одна переменная)

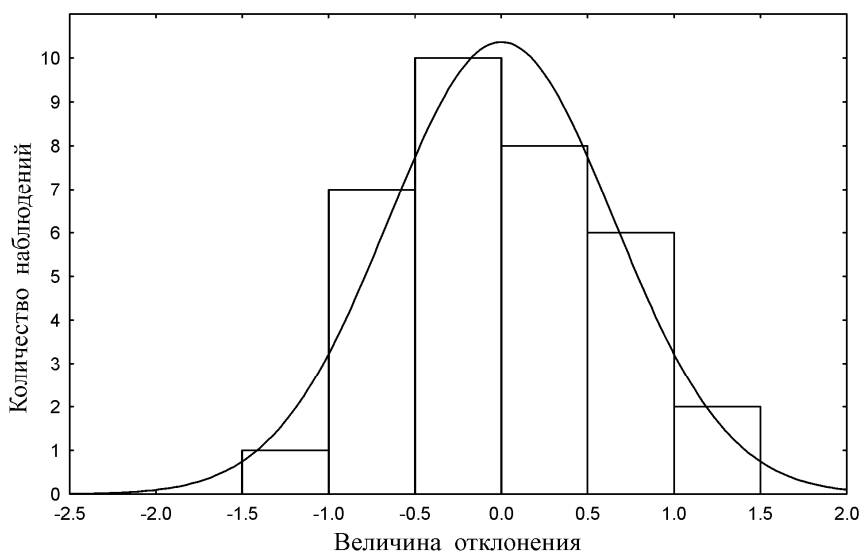


Рис. 5. Гистограмма отклонений фактической урожайности яровой пшеницы (т/га) от модельной

Выводы

1. Установлена значимая связь урожайности яровой пшеницы с продолжительностью вегетационного периода. Коэффициент корреляции данной зависимости составляет 0,42; оправдываемость уравнения – 62 %. Адекватность модели подтверждена с помощью статистического анализа с использованием критериев Стьюдента и Колмогорова-Смирнова. Найденная формула позволяет прогнозировать урожайность яровой пшеницы с месячной заблаговременностью.

2. Расчет множественной функции с применением пяти параметров показал, что главным лимитирующим фактором, влияющим на продуктивность яровой пшеницы, является увлажнение территории.

Полученные исследования позволят более эффективно использовать природные ресурсы региона, вести контроль состояния растений на отдельных этапах их развития, а также принимать своевременные решения при возделывании данной культуры.

Благодарности

Особую благодарность за помощь и поддержку при проведении исследований автор выражает научному руководителю профессору, доктору сельскохозяйственных наук С.И. Пряхиной и профессору, доктору физико-математических наук М.Б. Богданову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство сельского хозяйства Саратовской области. URL: <https://minagro.saratov.gov.ru/> (дата обращения: 01.11.2021).
2. Пряхина С.И., Гужова Е.И., Смирнова М.М. Формирование продуктивности яровой пшеницы в зависимости от гидротермических условий межфазных периодов онтогенеза // Вавиловские чтения – 2011: Материалы межд. научно-практ. конф. Саратов: Изд-во «КУБиК», 2011. Вып.12. С. 109–113.
3. Пряхина С.И., Васильева М.Ю. Природно-ресурсный потенциал зернового производства Саратовской области. Саратов: ИЦ «Наука», 2015. 108 с.

Поступила в редакцию 22.11.2021

Ормели Екатерина Ивановна, ассистент
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
E-mail: meteokatenok@mail.ru

E.I. Ormeli

DEPENDENCE OF SPRING WHEAT YIELD ON HYDROTHERMIC CONDITIONS IN THE SARATOV REGION

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-4-467-473

Using long-term stationary field studies on the phases of development of spring wheat, a prognostic equation for calculating the yield of a given crop depending on the duration of the growing season with a monthly lead time was derived. Taking into account the hydrothermic factors of the Saratov region, the prognostic equation of the multiple function of the yield of spring wheat from the amount of precipitation for April–May, the average air temperature in May, the amount of precipitation in June, the amount of precipitation in July, and the duration of the growing season was calculated.

Keywords: yield, spring wheat, hydrothermic conditions, duration of the growing season, linear trends.

REFERENCES

1. *Sayt Ministerstvo sel'skogo khozyaystva Saratovskoy oblasti* [Website of the Ministry of Agriculture of the Saratov Region], Available at: <https://minagro.saratov.gov.ru/> (accessed: 01.11.2021) (in Russ.).
2. Pryakhina S.I., Guzhova E.I., Smirnova M.M. [Formation of productivity of spring wheat depending on the hydrothermal conditions of the interphase periods of ontogenesis], in *Mater. Mezhd. nauch.-prakt. konf. "Vavilovskie chteniya – 2011"*, Saratov: KUBiK Publ., 2011, iss. 12, pp. 109–113 (in Russ.).

3. Pryakhina S.I., Vasil'eva M.Yu. *Prirodno-resursnyy potentsial zernovogo proizvodstva Saratovskoy oblasti* [Natural resource potential of grain production in the Saratov region], Saratov: Nauka Publ. Center, 2015, 108 p. (in Russ.).

Received 22.11.2021

Ormeli E.I., assistant
Saratov State University
Astrakhanskaya st., 83, Saratov, Russia, 410012
E-mail: meteokatenok@mail.ru