

УДК 633.11:631.526.32

DOI 10.31367/2079-8725-2019-64-4-19-26

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОГНОЗА СОДЕРЖАНИЯ СЫРОЙ КЛЕЙКОВИНЫ В ЗЕРНЕ ПШЕНИЦЫ

А. В. Пасынков¹, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, зав. лабораторией экспериментальных исследований и мониторинга агроэкосистем, ORCID ID: 0000-0003-1594-8577;

Е. Н. Пасынкова², доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства зерновых, зернобобовых культур и рапса, ORCID ID: 0000-0002-6588-8368

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 14;

²ФГБНУ «Ленинградский НИИСХ «Белогорка»,
188338, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, пос. Белогорка, ул. Институтская, 1; e-mail: pasynkova.elena@gmail.com

Проведение регрессионного анализа позволило получить уравнение множественной нелинейной регрессии, отражающее зависимость содержания сырой клейковины в зерне пшеницы (Y , %) от содержания белка ($X_1 = N_{\text{общ}} \cdot 5,7$; %) и массы 1000 зерен (X_2 , г): $Y = -41,928 + 0,081X_1^2 + 2,548X_2 - 0,028X_2^2$. В представленном уравнении все показатели качества приведены на 12%-ную влажность. Если содержание белка и (или) масса 1000 зерен определены на абсолютно сухое вещество (а.с.в.), то при использовании разработанного уравнения для прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы проводится их перерасчет с применением коэффициентов 0,88 и 1,136 соответственно. Цель исследований – выявить эффективность прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы при использовании разработанного уравнения регрессии, отражающего ее зависимость от содержания белка и массы 1000 зерен. Разработан алгоритм и представлены результаты проверки прогностических возможностей уравнения по независимым данным, то есть экспериментальным данным по содержанию белка, клейковины и массе 1000 зерен, полученным другими авторами в опытах с иными сортами пшеницы и в иных, чем у авторов статьи, почвенно-климатических условиях. Обобщение экспериментальных данных 124 литературных источников советских, российских и зарубежных авторов с общим числом наблюдений $n = 2485$ на более чем ста сортах пшеницы, выращенных в период с 1959 по 2019 г. в различных почвенно-климатических зонах СССР, России и за рубежом показало, что число значений, выходящих за пределы, регламентируемые ГОСТ Р 54478-2011 ($\pm 2\%$), составило 462, или 18,6% от общего числа наблюдений. Оправдываемость прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы при этом составила 81,4%. Разработанное уравнение может быть использовано для прогноза содержания сырой клейковины в зерне различных сортов озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы.

Ключевые слова: пшеница, белок, масса 1000 зерен, сырая клейковина, множественный регрессионный анализ, прогноз содержания клейковины.



EFFICIENCY OF RAW GLUTEN CONTENT PREDICTION IN WHEAT KERNELS

A. V. Pasynkov¹, Doctor of Biological Sciences, main researcher, head of the laboratory of experimental study and monitoring of agro-eco-systems, ORCID ID: 0000-0003-1594-8577;

E. N. Pasynkova², Doctor of Biological Sciences, main researcher, department of breeding and primary seed production of grain crops, legumes and rapeseed, ORCID ID: 0000-0002-6588-8368

¹FSBSI "Agrophysical Research Institute",
195220, Saint-Petersburg, Grazhdansky Prosp, 14;

²FSBSI "Leningrad Research Institute of Agriculture "Belogorka",
188338, Leningrad region, Gatchinsky district, v.of Belogorka, Institutskaya Str., 1; e-mail: pasynkova.elena@gmail.com

The conducted regression analysis allowed us to obtain the equation of multiple nonlinear regression, which reflects the dependence of the raw gluten content in wheat kernels (Y , %) on the protein content ($X_1 = N_{\text{total}} \cdot 5.7$, %) and 1000-kernel weight (X_2 , g): $Y = -41.928 + 0.081X_1^2 + 2.548X_2 - 0.028X_2^2$. In the presented equation, all quality indicators are given at 12% humidity. If protein content and/or 1000-kernel weight are determined for absolutely dry matter (a.d.m.), the developed equation to predict raw gluten content in wheat kernels is recalculated with the use of coefficients of 0.88 and 1.136, respectively. The purpose of the research is to identify the effectiveness of raw gluten content prediction in wheat kernels using the developed regression equation, which reflects its dependence on protein content and 1000-kernel weight. There have been developed and presented an algorithm and results of testing the predictive capabilities of the equation based on independent data. That is, using experimental data on protein and gluten content, and 1000-kernel weight obtained by other researchers in the experiments with different wheat varieties and in other soil and climatic conditions. The summarized experimental data of 124 Soviet, Russian and foreign literary references with a total number of observations $n = 2485$ on more than a hundred wheat varieties grown from 1959 to 2019 in various soil and climatic zones of the USSR, Russia and abroad have shown that the number of values beyond the limits regulated by GOST R 54478 - 2011 ($\pm 2\%$) was 462 or 18.6% of the total number of observations. The accuracy of the raw gluten content prediction in wheat kernels was 81.4%. The developed equation can be used to predict raw gluten content in kernels of various winter and spring soft and durum wheat varieties.

Keywords: wheat, protein, 1000-kernel weight, raw gluten, multiple regression analysis, gluten content prediction.

Введение. Проведение статистической обработки с использованием множественного регрессионного анализа позволило получить уравнения второго порядка, отражающие зависимость содержания сырой клейковины (зависимая переменная – Y) от содержания белка и массы 1000 зерен (независимые переменные – X_1 и X_2 соответственно) (Пасынков и Пасынкова, 2011). Дальнейшее проведение исследований позволило прийти к заключению о том, что разработанные уравнения могут быть использованы для прогноза содержания клейковины в зерне пшеницы после определения содержания белка и массы зерновки. Для проверки этого предположения был разработан алгоритм проверки их прогностических возможностей (Пасынков и др., 2017). Проверка прогностических возможностей уравнений показала, что максимально точно зависимость содержания клейковины (Y , %) в зерне пшеницы от содержания сырого белка ($X_1 = N_{\text{общ}} \cdot 5,7$; %) и массы 1000 зерен (X_2 , г) отражает уравнение второго порядка $Y = -41,928 + 0,081X_1^2 + 2,548X_2 - 0,028X_2^2$, в котором все переменные (содержание белка, клейковины и масса 1000 зерен) приведены на 12%-ную влажность. Если содержание белка и (или) масса

1000 зерен определены на абсолютно сухое вещество (а.с.в.), то при использовании разработанного уравнения для прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы проводится их перерасчет с применением коэффициентов 0,88 и 1,136 соответственно (Пасынков и Пасынкова, 2018).

В пределах полученных экспериментальных данных представлено графическое изображение разработанного уравнения регрессии (или поверхность отклика функции). Как видим, зависимость содержания сырой клейковины в зерне пшеницы от содержания сырого белка носит нелинейный характер. Каждое последующее его (белка) возрастание (на единицу) приводит к большему увеличению содержания клейковины по сравнению с предыдущим ($+ X_1^2$). Независимо от содержания белка, с возрастанием массы 1000 зерен содержание клейковины повышается. При этом каждое последующее увеличение массы 1000 зерен (на единицу) замедляет темпы роста накопления сырой клейковины в зерне ($+ X_2 - X_2^2$). После того как масса 1000 зерен достигает точки экстремума (45,5 г), каждое последующее ее повышение приводит к большему снижению содержания сырой клейковины в зерне пшеницы по сравнению с предыдущим.

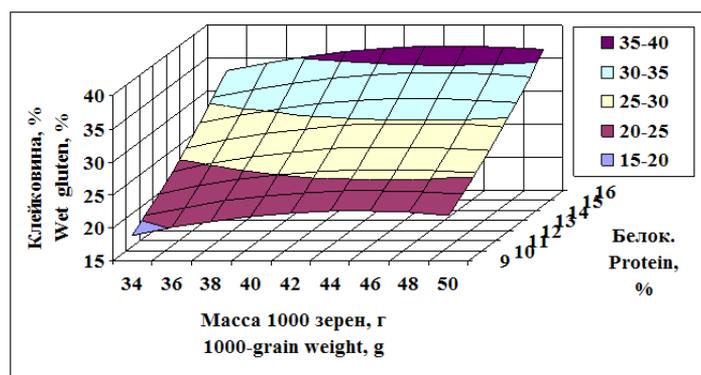


Рис. Зависимость содержания сырой клейковины (Y) в зерне от содержания белка (B) и массы 1000 (M) зерен ($Y = -41,928 + 0,081X_B^2 + 2,548X_M - 0,028X_M^2$)

Fig. Dependence of raw gluten content (Y) in kernels on protein percentage (B) and 1000-kernel (M) weight ($Y = -41.928 + 0.081X_B^2 + 2.548X_M - 0.028X_M^2$)

Заключительным этапом проведения исследований стала проверка эффективности прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы с использованием максимально большого количества литературных источников отечественных и зарубежных авторов, а также в максимально широком временном и биологическом интервале варьирования зависимой и независимых переменных.

Цель настоящего исследования – выявить эффективность прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы при использовании разработанного уравнения множественной нелинейной регрессии, отражающего ее (клейковины) зависимость от содержания белка и массы 1000 зерен.

Материалы и методы исследований. Для проверки эффективности прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы были использованы, а в последующем и обобщены данные более ста литературных источников советских, российских и зарубежных авторов, то есть независимые экспериментальные данные по содержанию белка, сырой клейковины и массе 1000 зерен, полученные другими авторами при проведении полевых опытов с иными сортами пшеницы и в иных, чем у авторов статьи, временных рамках и почвенно-климатических условиях. Подставляя получен-

ные другими авторами экспериментальные данные по содержанию сырого белка и массе 1000 зерен в разработанное уравнение регрессии и используя простые математические действия, авторы статьи рассчитали прогнозируемое содержание сырой клейковины в зерне пшеницы. Критерий оценки точности разработанного уравнения множественной нелинейной регрессии – регламентируемое как предыдущим (ГОСТ 13586.1-68), так и новым государственным стандартом (ГОСТ Р 54478-2011. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице) отклонение: «Оба результата признают приемлемыми, если критическая разность результатов определений по количеству клейковины ... не превышает 2%» в абсолютном выражении».

Результаты и их обсуждение. В таблицах 1–4 представлен алгоритм и результаты проверки прогностических возможностей и точности прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы по независимым данным. Ввиду того что объем публикации ограничен и не позволяет привести все случаи отклонений, в таблицах 1–4 приведены лишь некоторые типичные примеры, обнаруженные при проведении сравнительной оценки прогностических возможностей уравнения. В таблице 1 представлен

алгоритм проверки точности прогноза содержания клейковины в зерне различных сортов мягкой пшеницы для тех случаев, когда все переменные (показатели качества – содержание белка, клейковины и масса 1000 зерен) определены без учета влажности зерна, или на воздушно-сухое вещество (в.с.в.),

а в таблице 2 – когда содержание белка определено на а.с.в., а содержание клейковины и масса 1000 зерен – на в.с.в.

В таблице 3 представлен алгоритм проверки точности прогноза содержания сырой клейковины в зерне различных сортов твердой пшеницы.

1. Проверка точности прогноза содержания сырой клейковины в зерне мягкой пшеницы
(X_1 , X_2 и Y_3 – без учета влажности зерна или на в.с.в.)
1. Checking the accuracy of the forecast of the content of the grain of soft wheat
(X_1 , X_2 и Y_3 – excluding the moisture of the grain or on a.d.m.)

Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Ториков и др., 2017)*. Четыре сорта озимой пшеницы					Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Сайдяшева, Захаров, 2017)**. Сорт Симбирцит				
X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$	X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$
14,1	47,1	32,1	32,6	0,5	12,8	37,0	27,3	26,8	-0,5
14,8	45,0	33,8	33,9	0,1	12,9	37,7	27,8	27,1	-0,7
14,7	48,9	33,2	33,1	-0,1	13,1	38,0	28,4	27,4	-1,0
13,4	49,7	30,1	30,2	0,1	12,9	38,0	27,9	27,2	-0,7
14,2	47,1	32,3	33,9	1,6	13,0	37,2	27,8	27,3	-0,5
13,7	48,8	30,9	30,9	0,0	13,1	38,0	28,4	27,3	-1,1
13,2	50,3	29,5	30,4	0,9	13,0	37,3	27,8	27,0	-0,8
13,6	47,7	30,9	31,3	0,4	13,1	37,8	28,3	27,5	-0,8
13,9	51,9	30,5	30,6	0,1	13,1	38,5	28,6	27,4	-1,2
14,0	50,2	31,3	33,2	1,9	13,1	37,4	28,1	27,7	-0,4
14,6	48,8	33,0	34,0	1,0	13,2	37,7	28,4	27,7	-0,7
14,4	48,6	32,6	33,8	1,2	13,0	38,2	28,2	27,4	-0,8
$n = 12$	ЧЗ	0	ОП	100	12,9	37,7	27,8	27,3	-0,5
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Захаров, 2007)**. Сорт Батька					13,1	38,0	28,4	27,9	-0,5
					13,0	38,8	28,5	27,3	-1,2
12,4	37,5	26,7	25,1	-1,6	13,1	38,0	28,4	27,6	-0,8
12,7	33,0	24,7	25,8	1,1	13,4	38,2	29,1	28,3	-0,8
13,2	36,6	27,9	27,2	-0,7	13,2	38,3	28,7	27,5	-1,2
13,6	35,8	28,4	27,9	-0,5	$n = 18$	ЧЗ	0	ОП	100
12,3	37,3	26,4	24,8	-1,6	Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Окорков, Батяхина, 2018)**. Сорт Ладья				
12,8	32,9	24,9	26,0	1,1					
13,3	36,7	28,2	27,4	-0,8	10,2	34,6	21,1	21,0	-0,1
13,6	35,8	28,4	27,8	-0,6	11,1	34,9	22,9	23,3	0,4
11,7	37,0	25,1	23,9	-1,2	12,3	35,5	25,5	24,4	-1,1
12,2	37,6	26,3	24,8	-1,5	12,9	36,1	27,0	25,1	-1,9
13,0	38,0	28,2	26,2	-2,0	11,3	35,4	23,5	23,3	-0,2
13,1	37,8	28,3	26,6	-1,7	12,7	36,0	26,6	24,7	-1,9
$n = 12$	ЧЗ	0	ОП	100	$n = 6$	ЧЗ	0	ОП	100

Примечание: n – общее число наблюдений; * – генотипические различия; ** – модификационные различия; X_1 – содержание белка в зерне, %; X_2 – масса 1000 зерен, г; Y_T – теоретическое содержание сырой клейковины (расчет по уравнению регрессии), %; Y_3 – экспериментальное содержание сырой клейковины, %; $(Y_3 - Y_T)$ – отклонения экспериментальных величин от теоретических, ±; 2,8 – выделенные значения выходят за пределы ± 2%; ЧЗ – число значений, выходящих за пределы ± 2%; ОП – оправдываемость прогноза, % (то же в тексте и табл. 2–4).

2. Проверка точности прогноза содержания сырой клейковины в зерне мягкой пшеницы (X_1 , а.с.в.; X_2 и Y_3 – без учета влажности зерна или на в.с.в.)

2. Verification of accuracy of raw gluten content prediction in soft wheat kernels (X_1 , a.d.m.; X_2 and Y_3 without taking into account the moisture content of the grain or on a.d.m.)

Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Алабушев и др., 2018)**. Сорт Аксинья					Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Черно, Рябовол, 2016)**. Сорт Артемисия				
X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$	X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$
14,5/12,76	43,1	29,1	29,7	0,6	13,1/11,53	42,3	26,5	25,4	-1,1
14,8/13,02	43,3	29,6	30,9	1,3	15,2/13,38	43,9	30,5	28,9	-1,6
14,7/12,94	43,7	29,5	30,6	1,1	16,5/14,52	43,8	33,0	34,8	1,8
15,1/13,29	43,8	30,3	31,3	1,0	16,5/14,52	43,6	33,0	34,7	1,7
14,8/13,02	43,9	29,7	30,3	0,6	15,1/13,29	42,9	30,2	28,6	-1,6
15,1/13,29	44,2	30,3	30,9	0,6	15,9/13,99	43,9	31,8	34,1	2,3
15,0/13,20	44,3	30,1	30,2	0,1	16,3/14,34	43,3	32,6	35,0	2,4
15,1/13,29	44,6	30,3	30,6	0,3	15,0/13,20	43,4	30,0	28,5	-1,5
15,2/13,38	44,9	30,5	31,5	1,0	16,4/14,43	43,8	32,8	34,6	1,8
15,1/13,29	43,7	30,3	32,4	2,1	16,6/14,61	43,6	33,2	34,9	1,7
15,0/13,20	43,4	30,0	30,7	0,7	$n = 10$	43	2	ОП	80,0
$n = 11$	43	1	ОП	90,9	Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Григорьев и др., 2015)*. 11 сортов				
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Кузьмич и др., 2018)*. Семь линий и сорт					14,98/13,18	34,5	26,7	28,8	2,1
15,0/13,20	47,8	30,0	28,8	-1,2	14,52/12,78	35,6	26,5	27,9	1,4
13,6/11,97	40,4	26,9	28,0	1,1	15,30/13,46	34,4	27,3	29,0	1,7
14,4/12,67	44,7	29,0	28,1	-0,9	14,55/12,80	37,1	27,3	28,3	1,0
15,5/13,64	45,3	31,1	28,6	-2,5	13,88/12,21	36,1	25,6	26,7	1,1
16,0/14,08	48,0	31,9	30,8	-1,1	13,96/12,28	38,0	26,7	26,9	0,2
15,1/13,29	47,5	30,2	30,3	0,1	14,25/12,54	37,4	26,9	27,8	0,9
15,5/13,64	41,7	30,7	30,7	0,0	14,00/12,32	38,0	26,8	27,5	0,7
13,7/12,06	44,2	27,8	24,9	-2,9	13,72/12,07	40,2	27,1	26,6	-0,5
$n = 8$	43	2	ОП	75,0	13,89/12,22	39,3	27,1	26,6	-0,5
					13,24/11,65	39,7	26,1	23,4	-2,7
					$n = 11$	43	2	ОП	81,8

Примечание: 14,5/12,76 – а.с.в. / при влажности зерна 12% ($14,5 \cdot 0,88$); то же в таблицах 3–4.

3. Проверка точности прогноза содержания сырой клейковины в зерне различных сортов твердой пшеницы
3. Verification of accuracy of raw gluten content prediction in durum wheat kernels

Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Евдокимов и др., 2008)*. Пять сортов по двум предшественникам					Данные по X_1 , X_2 и Y_3 (Крючков и др., 2008)**. Сорт Оренбургская 10				
X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$	X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$
16,36/14,40	44,4	32,8	32,4	-0,4	12,37	48,4	28,2	26,0	-2,2
16,83/14,81	45,0	33,8	33,6	-0,2	12,65	47,6	28,9	26,7	-2,2
16,79/14,78	38,8	32,5	33,4	0,9	10,83	44,5	25,5	26,3	0,8
16,48/14,50	43,5	33,0	32,5	-0,5	12,27	47,6	28,1	28,7	0,6
16,57/14,58	41,7	32,9	32,5	-0,4	12,54	47,7	28,6	27,3	-1,3
14,73/12,96	44,3	29,6	29,3	-0,3	12,08	46,1	27,8	28,7	0,9
14,88/13,09	46,5	29,9	29,7	-0,2	12,08	46,9	27,8	26,3	-1,5
14,61/12,86	39,5	28,4	28,4	0,0	12,29	44,1	28,2	28,0	-0,2
14,76/12,99	45,0	29,7	29,0	-0,7	12,16	43,6	27,9	26,7	-1,2
14,46/12,72	42,4	28,9	28,9	0,0	12,66	46,5	29,0	29,0	0,0
$n = 10$	43	0	ОП	100	12,84	44,7	29,4	28,3	-1,1
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы Виолета Божанова и др., 2014**. Сорт Прогресс					11,32	44,7	26,4	26,7	0,3
					11,19	44,4	26,1	26,0	-0,1
					11,42	44,2	26,6	26,0	-0,6
12,62	56,2	25,7	25,4	-0,3	11,72	45,7	27,2	25,7	-1,5
13,64	57,1	27,3	26,4	-0,9	13,17	44,9	30,1	28,3	-1,8
13,97	57,8	27,6	26,9	-0,7	12,43	43,9	28,5	27,3	-1,2
13,59	56,7	27,5	26,2	-1,3	11,53	45,5	26,8	26,7	-0,1
14,04	57,3	28,1	26,8	-1,3	$n = 18$	43	2	ОП	88,9
$n = 5$	43	0	ОП	100					

4. Точность прогноза содержания клейковины в зерне спельты, мутантных линий, различных биотипов, разновидностей и синтетической пшеницы
4. Accuracy of raw gluten content prediction in the kernels of dinkel wheat, mutant lines, various biotypes, varieties and synthetic wheat

Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы Arkadiusz Stępień и др., 2017**. <i>Triticum aestivum ssp. Spelta L.</i>					Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы Потоцкая и др., 2019*. Синтетическая пшеница				
X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$	X_1	X_2	Y_T	Y_3	$(Y_3 - Y_T)$
12,37	39,7	27,5	27,5	0,0	16,5/14,52	42,5	32,9	32,0	-0,9
13,28	39,3	29,2	30,2	1,0	14,9/13,11	43,5	29,9	28,4	-1,5
12,60	40,3	28,1	28,6	0,5	18,5/16,28	43,0	37,3	36,7	-0,6
12,31	39,6	27,3	27,8	0,5	19,2/16,90	51,2	38,3	40,4	2,1
13,00	39,3	28,7	29,4	0,7	18,5/16,28	47,4	37,4	36,3	-1,1
12,88	40,0	28,6	29,1	0,5	19,7/17,34	46,8	40,3	40,9	0,6
$n = 6$	ЧЗ	0	ОП	100	21,1/18,57	40,2	43,2	42,4	-0,8
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы Arkadiusz Stępień и др., 2016**					20,7/18,22	41,8	42,5	40,1	-2,4
					20,9/18,39	45,7	43,4	40,8	-2,6
12,45	39,84	27,70	27,48	-0,22	21,0/18,48	52,5	42,3	39,4	-2,9
13,37	39,29	29,44	30,22	0,78	20,2/17,78	51,6	40,6	42,6	2,0
12,70	40,17	28,31	28,03	-0,28	19,2/16,90	39,7	38,2	38,7	0,5
12,81	38,79	28,07	30,07	2,00	19,2/16,90	40,0	38,3	39,0	0,7
12,87	40,75	28,82	27,09	-1,73	19,0/16,72	43,3	38,5	36,9	-1,6
$n = 5$	ЧЗ	0	ОП	100	18,5/16,28	46,9	37,5	36,2	-1,3
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы Павлюк и др., 2007А*. Мутантные линии					18,5/16,28	48,8	37,2	37,7	0,5
					17,6/15,49	43,4	35,3	34,8	-0,5
					18,1/15,93	45,3	36,6	36,7	0,1
12,7/11,18	41,3	25,7	25,3	-0,4	17,3/15,22	41,9	34,4	35,6	1,2
14,2/12,50	44,6	28,7	28,6	-0,1	18,0/15,84	46,4	36,3	35,6	-0,7
13,8/12,14	43,1	27,8	26,9	-0,9	18,6/16,37	42,8	37,5	38,1	0,6
12,8/11,26	41,5	25,9	25,7	-0,2	$n = 21$	ЧЗ	4	ОП	81,0
14,1/12,41	40,9	27,9	28,3	0,4	Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы (Зеленев и др., 2015)*. 12 сортов четырех разновидностей				
13,4/11,79	42,8	27,1	26,7	-0,4					
14,5/12,76	43,6	29,1	28,2	-0,9					
$n = 7$	ЧЗ	0	ОП	100	14,4	36,8	30,7	28,6	-2,1
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы (Павлюк и др., 2007В)*.					16,3	33,6	33,6	35,5	1,9
					14,4	31,3	27,2	27,2	0,0
12,7/11,18	41,3	25,7	25,3	-0,4	16,3	31,2	31,8	30,9	-0,9
13,4/11,79	42,2	27,0	26,2	-0,8	14,9	33,3	29,9	29,9	0,0
14,8/13,02	45,1	29,8	29,6	-0,2	15,1	36,4	32,2	29,1	-3,1
14,1/12,41	44,8	28,5	27,4	-1,1	15,4	31,7	29,9	30,1	0,2
14,5/12,76	45,3	29,2	28,7	-0,5	15,4	36,1	32,8	30,5	-2,3
$n = 5$	ЧЗ	0	ОП	100	14,2	30,9	26,4	26,5	0,1
Данные по X_1 , X_2 и Y_3 из работы (Хрунов, 2013)*. Биотипы сорта Саратовская 29					15,2	32,0	29,7	27,7	-2,0
					15,2	34,6	31,4	30,9	-0,5
					15,1	35,0	31,4	31,3	-0,1
16,7/14,70	36,0	31,0	31,0	0,0	$n = 12$	ЧЗ	3	ОП	75,0
15,9/13,99	34,4	28,4	28,9	0,5					
$n = 2$	ЧЗ	0	ОП	100					

Проверка прогностических возможностей разработанного уравнения по независимым экспериментальным данным, полученным другими исследователями при проведении полевых опытов

с различными сортами яровой и озимой мягкой (табл. 1, 2) и твердой пшеницы (табл. 3), показала высокую степень совпадения экспериментальным данным по содержанию сырой клейковины, полу-

ченых авторами публикаций и рассчитанных по разработанному уравнению.

В таблице 4 представлен алгоритм проверки эффективности прогноза содержания сырой клейковины в зерне спелты (Arkadiusz Stępień *et al.*, 2016; Arkadiusz Stępień *et al.*, 2017), мутантных линий (Павлюк и др., 2007а, Павлюк и др., 2007в), двух биотипов пшеницы сорта Саратовская 29 (Хрунов, 2013), синтетической (Потоцкая и др., 2019) и различных разновидностей (альбидум, лютеценс, грекум и эритроспермум) при возделывании 12 сортов яровой пшеницы (Зеленев и др., 2015). В рассматриваемых случаях оправдываемость прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы оказалась сравнительно высокой и находится в пределах 75–100%.

При проверке прогностических возможностей и точности прогноза разработанного уравнения регрессии по независимым данным (табл. 1–4), экспериментальное содержание белка в зерне варьировало в довольно широких пределах – 10,20 (Окорков, Батяхина, 2018) ... 18,57% в.с.в. (Потоцкая и др., 2019), или 11,59...21,10% а.с.в., сырой клейковины – 21,0 (Окорков и Батяхина, 2018) ... 42,6% в.с.в. (Потоцкая и др., 2019), а масса 1000 зерен – 30,9 (Зеленев и др., 2015) ... 57,8 г в.с.в. (Виолета Божанова и др., 2014). Практически именно в этих же пределах в подавляющем количестве научных публикаций изменялись и перечисленные выше показатели технологических качеств зерна пшеницы (Пасынков и др., 2017; Пасынков и Пасынкова, 2018).

Обобщение экспериментальных данных 124 литературных источников советских, российских и зарубежных авторов из Австрии, Белоруссии, Болгарии, Казахстана, Польши, Украины и Хорватии (Пасынков и др., 2017; Пасынков и Пасынкова, 2018) с общим числом наблюдений $n = 2485$ на более чем ста сортах озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы, выращенных в период с 1959 по 2019 гг. в различных почвенно-климатических зонах СССР, России и за рубежом показало, что число значений, выходящих за пределы, регламентируемые ГОСТ Р 54478-2011 ($\pm 2\%$), составило 462, или 18,6% от общего числа

наблюдений. При этом оправдываемость прогноза содержания сырой клейковины в зерне различных сортов пшеницы составила 81,4 %.

Опубликованные ранее данные (Пасынков и др., 2017; Пасынков и Пасынкова, 2018) и представленные в таблицах 1–4 по проверке эффективности прогноза содержания сырой клейковины на основе разработанного уравнения множественной нелинейной регрессии позволяют сделать вывод о его сравнительно высоких прогностических возможностях. При этом прогноз содержания сырой клейковины в зерне пшеницы подтверждается при модификационных (удобрения, средства защиты растений, биопрепараты, сроки и нормы высева (Захаров, 2007; Крючков и др., 2008; Черно и Рябовол, 2016; Сайдышева и Захаров, 2017; Окорков и Батяхина, 2018; Виолета Божанова и др., 2014; Arkadiusz Stępień *et al.*, 2016; Arkadiusz Stępień *et al.*, 2017; Алабушев и др., 2018)) и генотипических (сортовых) различиях (Павлюк и др., 2007а; Павлюк и др., 2007в; Евдокимов и др., 2008; Хрунов, автореферат диссертации кандидата биологических наук, 2013; Григорьев и др., 2015; Зеленев и др., 2015; Ториков и др., 2017; Кузьмич и др., 2018; Потоцкая и др., 2019). Отмеченное выше полностью соответствует закону о параллелизме модификационной и генотипической изменчивости признаков качества зерна, открытого А. Н. Павловым (Павлов, 1990а). Значение выявленного параллелизма состоит в том, что физиолого-биохимические механизмы реализации изменчивости признаков качества зерна, обусловленные как генотипом, так и условиями выращивания, одни и те же. По поведению того или иного признака при модификационной изменчивости можно предсказать его поведение в процессе селекции (Павлов, 1990в).

Выводы. Прогностические возможности разработанного уравнения регрессии подтверждаются при модификационных и генотипических различиях. Представленное уравнение со сравнительно высокой степенью вероятности может быть использовано для прогноза содержания сырой клейковины в зерне различных сортов озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы.

Библиографические ссылки

1. Алабушев А. В., Попов А. С., Марченко Д. М. и др. Технология возделывания мягкой озимой пшеницы сорта Аксинья в южной зоне Ростовской области // Зерновое хозяйство России, 2018. № 5(59). С. 14–21. DOI 10.31367/2079-8725-2018-59-5-14-21.
2. Григорьев Ю. П., Белан И. А., Колмаков Ю. В. Конкурсное сортоиспытание яровой мягкой пшеницы в подтаежной зоне Омской области // Вестник Курской ГСХА. 2015. № 7. С. 119–121.
3. Евдокимов М. Г., Юсов В. С., Колмаков Ю. В., Мешкова Л. В. Сравнительная характеристика новых сортов яровой твердой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 12. С. 10–13.
4. Захаров В. Т. Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий выращивания озимой пшеницы на основе оптимизации норм удобрения, систем защиты растений и основной обработки почвы в центральном районе Краснодарского края // Научный журнал КубГАУ. 2007. № 25(1). С. 8.
5. Зеленев А. В., Маркова И. Н., Питоня В. Н., Смутнев П. А. Сорта яровой пшеницы в сухостепной зоне каштановых почв Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 4(40). С. 39–45.
6. Крючков А. Г., Тейхриб П. П., Попов А. Н. Твердая пшеница. Современные технологии возделывания. Оренбург: ООО «Оренбургское книжное издательство», 2008. С. 704.
7. Кузьмич М. А., Лапочкина И. Ф., Гайнуллина И. Р. и др. Оценка технологических и хлебопекарных свойств новых линий яровой пшеницы // Инновационные разработки по селекции и технологиям возделывания сельскохозяйственных культур. ФИЦ «Немчиновка», 2018. С. 91–97.
8. Окорков В. В., Батяхина Н. А. К совершенствованию агротехники возделывания яровой пшеницы // Владимирский земледелец. 2018. № 2(84). С. 16–19.
9. Павлов А. Н. О параллелизме модификационной и генотипической изменчивости признаков качества зерна // Сельскохозяйственная биология. 1990. № 1. С. 13–27.
10. Павлов А. Н. Результаты исследований физиологических основ минерального питания растений // Тр. ВИУА. М., 1990. С. 3–16.
11. Павлюк Н. Т., Русанов И. А., Шенцев Г. Д. Селекция озимой пшеницы на зимостойкость и продуктивность // Селекция и семеноводство полевых культур: Юбилейный сборник научных трудов. Ч. 1. История селекции. Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2007а. С. 138–155.

12. Павлюк Н. Т., Русанов И. А., Шенцев Г. Д. Высота растений озимой пшеницы и устойчивость к полеганью // Селекция озимой пшеницы на зимостойкость и продуктивность: Селекция и семеноводство полевых культур: Юбилейный сборник научных трудов. Ч. 1. История селекции. Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2007в. С. 155–169.
13. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Статистические зависимости основных показателей качества зерновых культур // Агротехника. 2011. № 2. С. 24–40.
14. Пасынков А. В., Дубовик Д. В., Пасынкова Е. Н. Прогноз содержания сырой клейковины в зерне пшеницы на основе уравнений множественной регрессии // Вестник Курской ГСХА. 2017. № 4. С. 8–14.
15. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Особенности использования уравнений множественной регрессии для прогноза содержания сырой клейковины в зерне пшеницы // Агротехнический вестник. 2018. № 3. С. 69–74. DOI 10.24411/0235-2516-2018-10016.
16. Потоцкая И. Я., Шаманин В. П., Шепелев С. С. и др. Синтетическая пшеница как источник улучшения качества зерна в селекции пшеницы // Вестник Курской ГСХА. 2019. № 2. С. 55–62.
17. Сайдяшева Г. В., Захаров С. А. Эффективность применения минеральных, биоминеральных удобрений и биопрепарата «Бисолбифит» на посевах яровой пшеницы в условиях Среднего Поволжья // Вестник Ульяновской ГСХА. 2017. № 1(37). С. 56–65. DOI 10.18286/1816-4501-2017-1-56-65.
18. Ториков В. В., Мельникова О. В., Мамеев В. В. Урожайность и качество сортов нового поколения хлебопекарной озимой пшеницы // Вестник Брянской ГСХА. 2017. № 3(61). С. 9–14.
19. Черно О. Д., Рябовол Я. С. Вплив різних систем удобрення на технологічні показники зерна пшениці сорту Артемія // Збірник наукових праць СГІ-НЦНС. 2016. Вип. 27(67). С. 156–162.
20. Arkadiusz Stępień, Katarzyna Wojtkowiak, Michał Skłodowski, Mirosław Pietrusiewicz. Wpływ dolistnego nawożenia Cu, Zn i Mn na wskaźniki jakościowe ziarna i elementy plonowania pszenicy ozimej orkisz (*Triticum aestivum* SSP. *Spelta* L.) // Fragmenta Agronomica. 2017. No. 34(3). S. 97–108.
21. Arkadiusz Stępień, Katarzyna Wojtkowiak, Krzysztof Orzech, Artur Wiktorski. Nutritional and technological characteristics of common and spelt wheats are affected by mineral fertilizer and organic stimulator nano-gro // Acta Sci. Pol. Agricultura. 2016. No. 15(2). S. 49–63.
22. Виолета Божанова, Величка Котева, Тодорка Савова, Марина Марчева и др. Избор на подходящи сортове зърнено-житни култури и семепроизводство за нуждите на биологичното земеделие в България – проблеми и отговори / Национална конференция с международно участие на тему: «Биологични растениевъдство, животновъдство и храни». София, 2014. С. 68–76.

References

1. Alabushev A. V., Popov A. S., Marchenko D. M. i dr. Tekhnologiya vozdel'yvaniya myag-koy ozimoy pshenicy sorta Aksin'ya v yuzhnoy zone Rostovskoy oblasti [The cultivation technology of soft winter wheat variety 'Aksinya' in the southern zone of the Rostov region] // Zernovoe hozyaj-stvo Rossii, 2018. № 5(59). S. 14–21. DOI 10.31367/2079-8725-2018-59-5-14-21.
2. Grigor'ev Yu. P., Belan I. A., Kolmakov Yu. V. Konkursnoe sortoispytanie yarovoj myagkoj pshenicy v podtaezhnoj zone Omskoj oblasti [Competitive variety testing of spring soft wheat in the subtaiga zone of the Omsk region] // Vestnik Kurskoj GSKHA. 2015. № 7. S. 119–121.
3. Evdokimov M. G., Yusov V. S., Kolmakov Yu. V., Meshkova L. V. Sravnitel'naya harak-teristika novyh sortov yarovoj tverdoj pshenicy [Comparative characteristics of the new spring durum wheat varieties] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2008. № 12. S. 10–13.
4. Zaharov V. T. Razrabotka energo- i resursosberegayushchih tekhnologij vyrashchivaniya ozimoy pshenicy na osnove optimizatsii norm udobreniya, sistem zashchity rastenij i os-novnoj obrabotki pochvy v central'nom rajone Krasnodarskogo kraja [Development of energy- and resource-saving technologies to grow winter wheat based on the optimization of fertilizer rates, plant protection systems and basic tillage in the central region of the Krasnodar Territory] // Nauchnyj zhurnal KubGAU. 2007. № 25(1). S. 8.
5. Zelenev A. V., Markova I. N., Pitonya V. N., Smutnev P. A. Sorta yarovoj pshenicy v suhostepnoj zone kashtanovyh pochv Volgogradskoj oblasti [Spring wheat varieties in the steppe zone of chestnut soils of the Volgograd region] // Izvestiya Nizhnevolszhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2015. № 4(40). S. 39–45.
6. Kryuchkov A. G., Tejhrib P. P., Popov A. N. Tverdaya pshenica. Sovremennye tekhnologii vozdel'yvaniya [Durum wheat. Modern cultivation technologies]. Orenburg: OOO "Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo", 2008. S. 351, 473, 492.
7. Kuz'mich M. A., Lapochkina I. F., Gajnullin N. R. i dr. Ocenka tekhnologicheskikh i hlebopekarnykh svojstv novyh linij yarovoj pshenicy [Evaluation of technological and baking properties of new spring wheat lines] // Innovacionnye razrabotki po se-lekcii i tekhnologiyam vozdel'yvaniya sel'skohozyajstvennykh kul'tur. FIC "Nemchinovka", 2018. S. 91–97.
8. Okorkov V. V., Batyahina N. A. K sovershenstvovaniyu agrotekhniki vozdel'yvaniya yarovoj pshenicy [To the improvement of the agro technologies of spring wheat cultivation] // Vladimirskij zemledec. 2018. № 2(84). С. 16–19.
9. Pavlov A. N. O parallelizme modifikacionnoj i genotipicheskoy izmenchivosti priznakov kachestva zerna [On parallelism of modification and genotypic variability of the grain quality traits] // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 1990. № 1. S. 13–27.
10. Pavlov A. N. Rezul'taty issledovanij fiziologicheskikh osnov mineral'nogo pi-taniya rastenij [The results of study of the physiology of mineral nutrition of plants] // Tr. VIUA. M., 1990. S. 3–16.
11. Pavlyuk N. T., Rusanov I. A., Shencev G. D. Selekcija ozimoy pshenicy na zimo-stojkost' i produktivnost' [Winter wheat breeding for winter tolerance and productivity] // Selekcija i semenovodstvo polevykh kul'tur: YUbilejnyj sbornik nauchnyh trudov. Ch. 1. Istoriya selekcii. Voronezh: FGOU VPO VGAU, 2007A. S. 138–155.
12. Pavlyuk N. T., Rusanov I. A., Shencev G. D. Vysota rastenij ozimoy pshenicy i ustojchivost' k poleganiyu [Height of winter wheat plants and its lodging resistance] // Selekcija ozimoy pshenicy na zimostojkost' i produktivnost': Selekcija i semenovodstvo polevykh kul'tur: YUbilejnyj sbornik nauchnyh trudov. Ch. 1. Istoriya selekcii. Voronezh: FGOU VPO VGAU, 2007V. S. 155–169.

13. Pasyнков A. V., Pasynkova E. N. Statisticheskie zavisimosti osnovnykh pokazatelej kachestva zernovykh kul'tur [Statistical dependencies of the main indicators of grain crops quality] // *Agrohimiya*. 2011. № 2. S. 24–40.
14. Pasyнков A. V., Dubovik D. V., Pasynkova E. N. Prognoz sodержaniya syroj klej-koviny v zerne pshenicy na osnove uravnenij mnozhestvennoj regressii [Raw gluten content prediction in wheat kernels based on the equations of multiple regression] // *Vestnik Kurskoj GSKHA*. 2017. № 4. S. 8–14.
15. Pasyнков A. V., Pasynkova E. N. Osobennosti ispol'zovaniya uravnenij mnozhe-stvennoj regressii dlya prognoza sodержaniya syroj klejkoviny v zerne pshenicy [Features of using multiple regression equations to predict raw gluten content in wheat kernels] // *Agro-himicheskij vestnik*. 2018. № 3. S. 69–74. DOI 10.24411/0235-2516-2018-10016.
16. Potockaya I. Ya., Shamanin V. P., Shepelev S. S. i dr. Sinteticheskaya pshenica kak istochnik uluchsheniya kachestva zerna v selekcii pshenicy [Synthetic wheat as a source of improving the quality of grain in wheat breeding] // *Vestnik Kurskoj GSKHA*. 2019. № 2. S. 55–62.
17. Sajdyasheva G. V., Zaharov S. A. Effektivnost' primeneniya mineral'nykh, biomi-neral'nykh udobrenij i biopreparata Bisolbifit na posevah yarovoj pshenicy v usloviyah Srednego Povolzh'ya [Efficiency of application of mineral, biomineral fertilizers and bio-preparation 'Bisolbifit' on spring wheat in the conditions of the Middle Povolzhie] // *Vestnik Ul'yanovskoj GSKHA*. 2017. № 1(37). S. 56–65. DOI 10.18286/1816-4501-2017-1-56-65.
18. Torikov V. V., Mel'nikova O. V., Mameev V. V. Urozhajnost' i kachestvo sortov no-vogo pokoleniya hlebopekarnoj ozimoj pshenicy [Productivity and quality of a new generation of baking winter wheat varieties] // *Vestnik Bryanskoj GSKHA*. 2017. № 3(61). S. 9–14.
19. Chernov O. D., Ryabovol Ya. S. Vpliv riznih sistem udobreniya na tekhnologichni pokaz-niki zerna pshenicy sortu Artemisiya // *Zbirnik naukovih prac' SGI-NCNS*. 2016. Vip. 27(67). S. 156–162.
20. Arkadiusz Stępień, Katarzyna Wojtkowiak, Michał Skłodowski, Mirosław Pietrusewicz. Wpływ dolistnego nawożenia Su, Zn i Mn na wskaźniki jakościowe ziarna i elementy plonowania pszenicy ozimej orkisz (*Triticum aestivum* SSP. *Spelta* L.) // *Fragmenta Agronomisa*. 2017. No. 34(3). S. 97–108.
21. Arkadiusz Stępień, Katarzyna Wojtkowiak, Krzysztof Orzech, Artur Wiktorowski. Nutri-tional and technological characteristics of common and spelt wheats are affected by mineral fertiliz-er and organic stimulator nano-gro // *Acta Sci. Pol. Agricultura*. 2016. No. 15(2). S. 49–63.
22. Violeta Bozhanova, Velichka Koteva, Todorka Savova, Marina Marcheva i dr. Izbor na podhodyashchi sortove z"rnenno-zhitni kulturi i semeproizvodstvo za nuzhdite na biologich-noto zemedelie v B"lgariya – problemi i otgovori / Nacionalna konferenciya s mezhduna-rodno uchastie na temu: "Biologichni rasteniev"dstvo, zhivotnov"dstvo i hrani". Sofiya, 2014. S. 68–76.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.