

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗА СОДЕРЖАНИЯ БЕЛКА В ЗЕРНЕ ПШЕНИЦЫ

А. В. Пасынков¹, доктор биологических наук, А. А. Завалин², академик РАН,
Е. Н. Пасынкова¹, доктор биологических наук

¹Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» – филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, 188338, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, пос. Белогорка, ул. Институтская, 1

²Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31 а
E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

Исследование проводили с целью расширения возможности использования разработанного уравнения множественной нелинейной регрессии, отражающего зависимость содержания белка в зерне пшеницы (Y , %) от количества сырой клейковины (X_1 , %) и массы 1000 зерен (X_2 , г). Показана возможность практического использования разработанного и трех усовершенствованных уравнений для прогноза белковости зерна пшеницы. Представлен алгоритм и результаты проверки прогностических возможностей и точности прогноза уравнений по независимым данным. Обобщение экспериментальных данных из 288 публикаций отечественных и зарубежных авторов с общим числом наблюдений $n = 4604$ на более чем трехстах сортах озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы в период с 1959 по 2020 гг. в России и за рубежом (Албания, Беларусь, Болгария, Египет, Казахстан, Литва, Польша, Словакия и Украина) показало, что за пределы отклонений, допускаемых ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка», выходило 755, или 16,4 %. При этом оправдываемость прогноза содержания белка достигала 83,6 %. Разработанные уравнения могут быть использованы для прогноза содержания белка практически во всех случаях, когда результаты анализа содержания белка и сырой клейковины в зерне пшеницы, а также масса 1000 зерен приводятся при фактической или фиксированной влажности либо в пересчете на абсолютно сухое вещество.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF PROTEIN CONTENT PREDICTION IN WHEAT KERNELS

A.V. Pasynkov¹, A.A. Zavalin², E.N. Pasynkova¹

¹Leningrad Research Agricultural Institute «Belogorka», the branch of the Lorkh Federal Research Center of Potato Breeding, 188338, Leningradskaya obl., Gatchinskiy r-n, pos. Belogorka, ul. Institutskaya, 1

²Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, 127550, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 а
E-mail: pasynkova.elena@gmail.com

The study was conducted in order to expand the possibilities of using the developed multiple nonlinear regression equation, reflecting the dependence of the protein content in wheat grain (Y , %) on the content of raw gluten (X_1 , %) and the mass of 1000 grains (X_2 , g). The possibility of practical use of the developed and three improved equations for predicting the protein content of wheat grain is shown. An algorithm and results of checking the prognostic capabilities and accuracy of predict equations from independent data are presented. Generalization of experimental data from 288 literature sources of domestic and foreign authors with a total number of observations $n = 4604$ on more than three hundred varieties of winter and spring soft and durum wheat grown in the period from 1959 to 2020 in Russia and abroad (Albania, Belarus, Bulgaria, Egypt, Kazakhstan, Lithuania, Poland, Slovakia and Ukraine) showed that the number of values that go beyond to limits regulated by GOST 10846-91 «Protein determination method» was 755 or 16.4 %. At the same time, the accuracy of prediction the protein content reached 83.6 %. The developed equations can be used to predict of protein content in almost all cases: when the results of the analysis of protein content and raw gluten in wheat kernel, as well the 1000-kernels weight are given at actual or fixed moisture content, or in terms of dry matter.

Ключевые слова: пшеница (*Triticum aestivum* L.), белок, масса 1000 зерен, сырая клейковина, множественный регрессионный анализ, прогноз содержания белка.

Key words: wheat (*Triticum aestivum* L.), protein, raw gluten, 1000-kernels weight, multiple regression analysis, protein content prediction.

Содержание белка, наряду с количеством сырой клейковины, служит одним из важнейших показателей качества зерна пшеницы, регламентируемых ГОСТом Р 52554–2006 «Пшеница. Технические условия», который, в свою очередь, определяет его пригодность для хлебопечения. Для определения содержания белка в зерне наиболее широко распространение в последние годы получил химический метод Кьельдаля, который выступает стандартным методом, используемым ICC, AACCS и ISO. При этом считается, что он довольно длительный, трудоемкий, относительно низко производительный и представ-

ляет определенную опасность для персонала и окружающей среды [1, 2].

Большую практическую значимость может иметь создание целостной системы уравнений, позволяющих прогнозировать наиболее важные показатели качества сельскохозяйственных культур на основе зависимости изменений отдельных (наиболее простых и экспрессных в определении) качественных признаков [3]. Для пшеницы к их числу можно отнести содержание сырой клейковины, регламентируемое ГОСТ Р 52554–2006 и массу 1000 зерен [4, 5].

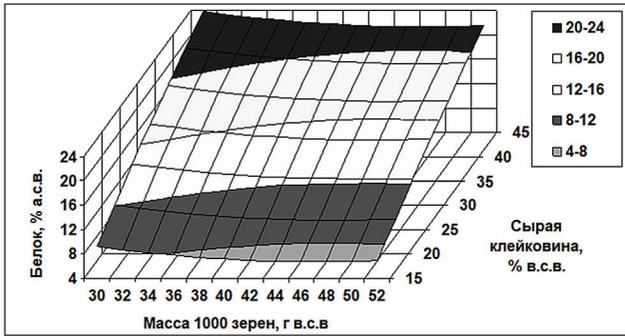


Рис. 1. Зависимость содержания белка (Y, % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X₁, % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X₂, г в.с.в.).

каждое последующее ее повышение приводит к большему увеличению содержания белка в зерне пшеницы, по сравнению с предыдущим [8, 9].

Проверка точности прогноза содержания белка в зерне пшеницы заключалась в использовании независимых данных. Подставляя в разработанное уравнение результаты экспериментальных исследований других авторов и используя простые математические действия, рассчитывали теоретическое (Y_т, %) или прогнозируемое содержание белка в зерне пшеницы (табл. 1). Следующий этап предусматривал сравнение величин, рассчитанных по уравнению, с экспериментальными данными (Y_э) или (Y_э – Y_т). Оценку точности разработанного уравнения проводили на основании положения ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка», согласно которому допускаемые расхождения при контрольных определениях общего азота (N_{общ}) не должны превышать 0,045X + 0,04, где X – среднее арифметическое первоначального (в нашем случае – экспериментального или N_э = Y_э: 5,7) и контрольного (рассчитанного по разработанному уравнению или N_т = Y_т: 5,7) определений. Один из критериев оценки точности прогноза – сумма квадратов отклонений экспериментальных величин содержания общего азота (N_э) в зерне от теоретических (N_т) или ∑ (N_э – N_т)². Второй критерий – точность (оправдываемость) прогноза или отношение количества значений, когда расхождения экспериментальных величин содержания общего азота в зерне пшеницы от теоретических (N_э – N_т) не превышали регламентируемые ГОСТ 10846-91 допускаемые

отклонения к общему числу наблюдений (n), выраженные в процентах [8, 9].

Результаты и обсуждение. Обобщение экспериментальных данных из 147 источников, опубликованных отечественными и зарубежными (Албания, Беларусь, Болгария, Египет, Казахстан, Литва, Польша, Словакия и Украина) авторами, частично представленных в этой публикации и ранее в работах [8, 9] с общим числом наблюдений n = 2328 на более чем двухстах сортах озимой и яровой мягкой и твердой пшеницы показало, что за пределы допускаемых отклонений, регламентируемых ГОСТ 10846-91, выходило 384 значения, или 16,5 % от общего числа наблюдений. При этом точность прогноза содержания белка в зерне пшеницы у уравнения (1) составила 83,5 % (табл. 2).

Табл. 2. Результаты оценки точности прогноза уравнений

Число источников	Общее число наблюдений (n)	Число значений, выходящих за пределы допускаемых отклонений	Точность (оправдываемость) прогноза, %
Y (1) = 16,0570 + 0,6768X₁ – 0,0032X₁² – 0,7891X₂ + 0,0083X₂²			
147	2328	384	83,5
Y (2) = 14,1301 + 0,5956X₁ – 0,0028X₁² – 0,6944X₂ + 0,0073X₂²			
141	2276	371	83,7
Всего			
288	4604	755	83,6

В тех случаях, когда содержание белка определяли без учета влажности зерна (или на в.с.в.), а массу 1000 зерен в расчете на а.с.в., при использовании уравнения (1) для прогноза содержания белка требуется проведение перерасчета белка и (или) массы 1000 зерен [8, 9] с применением коэффициента 1,136 (табл. 3).

Необходимость перерасчета показателей качества зерна на постоянную влажность (в этом случае – 12 %) обусловлена, во-первых, тем, что согласно ГОСТ Р 54478–2011 «Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице» содержание клейковины рекомендуется определять без учета влажности. Во-вторых, ГОСТ 10846-91 «Метод определения белка» и ГОСТ ISO 520–2014 «Определение массы 1000 зерен» регламентируют, что указанные признаки могут определяться как при фактической влажности, так и в пересчете на а.с.в.

С целью исключения перерасчета в тех случаях, когда все показатели качества зерна пшеницы (содержание

Табл. 3. Проверка точности прогноза белковости зерна различных сортов пшеницы (X₁, X₂ и Y_э – без учета влажности зерна или на в.с.в.)

Данные по X ₁ , X ₂ и Y _э из [13]. n = 15. Памяти Азии и Омская 35 (Россия)						Данные по X ₁ , X ₂ и Y _э из [14]. n = 8. Сорт Gemmeiza 9 (Египет)					
X ₁	X ₂	Y _э	Y _т	(N _э –N _т)	ДО	X ₁	X ₂	Y _э	Y _т	(N _э –N _т)	ДО
28,6	34,5	14,16/16,09*	15,45	0,111	0,164	27,22	52,67	12,36/14,04	13,57	0,082	0,149
28,2	34,5	13,99/15,89	15,25	0,112	0,163	27,85	52,10	12,36/14,04	13,84	0,035	0,150
27,6	34,2	13,80/15,68	15,02	0,115	0,161	28,30	51,45	12,50/14,20	14,02	0,032	0,151
25,8	34,6	12,96/14,72	14,02	0,123	0,153	31,20	49,50	13,28/15,09	15,33	-0,044	0,160
25,8	34,8	12,93/14,69	13,98	0,124	0,153	28,26	53,35	12,41/14,10	14,15	-0,010	0,152
25,1	34,1	12,50/14,20	13,77	0,075	0,150	28,76	52,97	12,47/14,17	14,36	-0,035	0,153
25,0	33,7	12,42/14,11	13,81	0,052	0,150	28,96	52,09	12,54/14,25	14,39	-0,025	0,153
25,0	33,6	12,40/14,09	13,83	0,044	0,150	30,22	48,98	13,30/15,11	14,85	0,046	0,158
24,6	33,6	12,14/13,79	13,63	0,029	0,148	ЧЗ = 0 ОП = 100% ∑ = 0,0149					
27,0	32,1	13,44/15,27	15,22	0,008	0,160	Данные по X ₁ , X ₂ и Y _э из [15]. n = 5. Сорта Akteur, Julius, Fidelius (Польша)					
29,3	36,6	14,52/16,49	15,38	0,196*	0,166	23,5	48,11	10,0/11,36	11,44	-0,014	0,130
24,4	32,1	12,25/13,92	13,89	0,005	0,150	26,3	49,41	12,0/13,63	12,92	0,125	0,145
26,8	36,8	13,33/15,14	14,10	0,183*	0,155	25,6	49,48	11,4/12,95	12,56	0,068	0,141
23,4	31,1	11,73/13,33	13,63	-0,053	0,146	26,2	49,84	11,5/13,06	12,88	0,032	0,142
26,3	36,1	12,90/14,65	13,97	0,119	0,153	25,1	49,14	11,0/12,50	12,29	0,035	0,138
ЧЗ = 2 ОП = 86,7% ∑ = 0,1693						ЧЗ = 0 ОП = 100% ∑ = 0,0229					

*в числителе содержание белка указано при влажности зерна 12 %, в знаменателе – в пересчете на а.с.в.

белка и сырой клейковины, а также масса 1000 зерен) определены без учета влажности зерна, было получено уравнение (2):

$$Y(2) = 14,1301 + 0,5956X_1 - 0,0028X_1^2 - 0,6944X_2 + 0,0073X_2^2 \quad (2)$$

Проверка точности его прогноза (рис. 2) по обобщенным экспериментальным данным из 141 опубликованного источника отечественных и зарубежных авторов, частично представленных в этой публикации (см. табл. 3) и ранее в работе [10] с общим числом наблюдений $n = 2276$ на более чем двухстах сортах пшеницы, показала, что за пределы допускаемых отклонений, регламентируемых ГОСТ 10846-91, выходит 371 значение, или 16,3 % от общего числа наблюдений. При этом точность прогноза содержания белка составила 83,7 % (см. табл. 2), то есть находилась в тех же пределах, что и у уравнения (1).

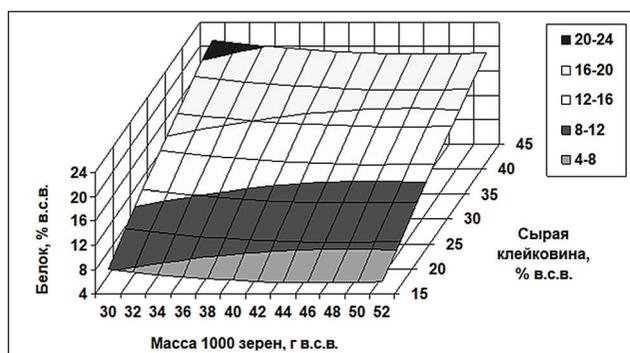


Рис. 2. Зависимость содержания белка (Y, % в.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X₁, % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X₂, г в.с.в.).

С целью исключения перерасчета массы 1000 зерен, когда ее экспериментальные величины, как и содержания белка, приведены к а.с.в., а содержание сырой клейковины определено без учета влажности зерна или на в.с.в., было разработано уравнение (3), а когда все показатели технологических качеств зерна пшеницы приведены к а.с.в. – уравнение (4):

$$Y(3) = 16,0570 + 0,6768X_1 - 0,0032X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2 \quad (3)$$

$$Y(4) = 16,0570 + 0,7691X_1 - 0,0041X_1^2 - 0,8967X_2 + 0,0107X_2^2 \quad (4)$$

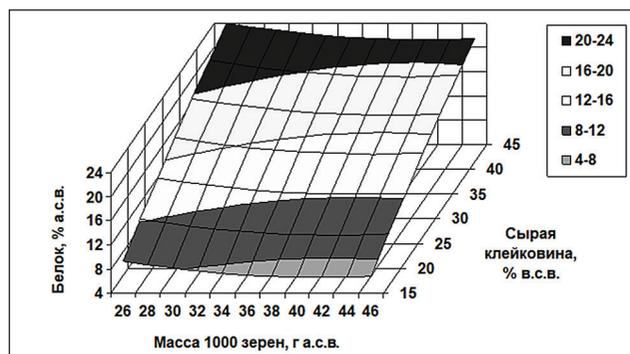


Рис. 3. Зависимость содержания белка (Y, % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X₁, % в.с.в.) и массы 1000 зерен (X₂, г а.с.в.).

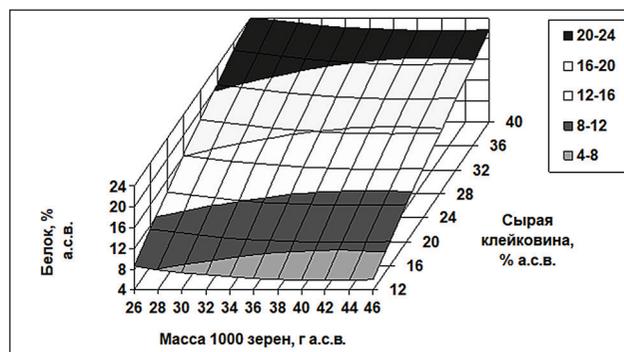


Рис. 4. Зависимость содержания белка (Y, % а.с.в.) в зерне пшеницы от содержания сырой клейковины (X₁, % а.с.в.) и массы 1000 зерен (X₂, г а.с.в.).

При этом, как и у уравнения (1), у всех усовершенствованных уравнений (2), (3) и (4), отражающих зависимость содержания белка в зерне от содержания сырой клейковины и массы 1000 зерен, точка экстремума по содержанию клейковины находится вне пределов экспериментальных данных. Однако точка экстремума по массе 1000 зерен у уравнений (3) и (4) сместилась в область меньших величин (рис. 3, 4), по сравнению с уравнениями (1) и (2), и составила 41,9 г.

Сравнение результатов прогноза разработанных уравнений показало (табл. 4), что при одинаковой точ-

Табл. 4. Сравнительная оценка точности прогноза разработанных уравнений

Данные по X ₁ , X ₂ и Y _э из [16]. n = 8.						
7 линий яровой пшеницы и сорт Лада						
X ₁	X ₂	Y _э	Y _т	(N _э -N _т)	ДЮ	(N _э -N _т) ²
Y(1) = 16,0570 + 0,6768X ₁ - 0,0032X ₁ ² - 0,7891X ₂ + 0,0083X ₂ ²						
28,8	47,8	15,0	14,14	0,151	0,155	0,0228
28,0	40,4	13,6	14,17	-0,100	0,150	0,0100
28,1	44,7	14,4	13,86	0,095	0,152	0,0090
28,6	45,3	15,5	14,08	0,249*	0,157	0,0620
30,8	48,0	16,0	15,11	0,156	0,163	0,0243
30,3	47,5	15,1	14,87	0,040	0,158	0,0016
30,7	41,7	15,5	15,35	0,026	0,162	0,0007
24,9	44,2	13,7	12,26	0,253*	0,142	0,0640
ЧЗ = 2	ОП = 75%	Σ(N _э -N _т) ² = 0,1944				
Y(2) = 14,1301 + 0,5956X ₁ - 0,0028X ₁ ² - 0,6944X ₂ + 0,0073X ₂ ²						
28,8	47,8	13,20	12,45	0,132	0,141	0,0174
28,0	40,4	11,97	12,47	-0,088	0,136	0,0077
28,1	44,7	12,67	12,20	0,082	0,138	0,0067
28,6	45,3	13,64	12,40	0,218*	0,143	0,0475
30,8	48,0	14,08	13,31	0,135	0,148	0,0182
30,3	47,5	13,29	13,09	0,035	0,144	0,0012
30,7	41,7	13,64	13,51	0,023	0,147	0,0005
24,9	44,2	12,06	10,79	0,223*	0,130	0,0497
ЧЗ = 2	ОП = 75%	Σ(N _э -N _т) ² = 0,1489				
Y(3) = 16,0570 + 0,6768X ₁ - 0,0032X ₁ ² - 0,8967X ₂ + 0,0107X ₂ ²						
28,8	42,06	15,0	14,11	0,156	0,155	0,0243
28,0	35,55	13,6	14,14	-0,095	0,150	0,0090
28,1	39,34	14,4	13,83	0,100	0,151	0,0100
28,6	39,86	15,5	14,05	0,254*	0,157	0,0645
30,8	42,24	16,0	15,08	0,161	0,163	0,0259
30,3	41,80	15,1	14,84	0,046	0,158	0,0021
30,7	36,70	15,5	15,32	0,032	0,162	0,0010
24,9	38,90	13,7	12,24	0,256*	0,142	0,0655
ЧЗ = 2	ОП = 75%	Σ(N _э -N _т) ² = 0,2023				
Y(4) = 16,0570 + 0,7691X ₁ - 0,0041X ₁ ² - 0,8967X ₂ + 0,0107X ₂ ²						
25,34	42,06	15,0	14,13	0,153	0,155	0,0234
24,64	35,55	13,6	14,16	-0,098	0,150	0,0096
24,73	39,34	14,4	13,85	0,096	0,152	0,0092
25,17	39,86	15,5	14,08	0,249*	0,157	0,0620
27,10	42,24	16,0	15,10	0,158	0,163	0,0250
26,66	41,80	15,1	14,86	0,042	0,158	0,0018
27,02	36,70	15,5	15,35	0,026	0,162	0,0007
21,91	38,90	13,7	12,25	0,254*	0,142	0,0645
ЧЗ = 2	ОП = 75%	Σ(N _э -N _т) ² = 0,1962				

ности уравнение (2), не предполагающее перерасчета всех изученных показателей качества зерна пшеницы, представляется более точным, чем три остальных, так как при прочих равных условиях характеризуется меньшей суммой квадратов отклонений экспериментальных величин содержания общего азота в зерне от теоретических ($\sum (N_{\text{э}} - N_{\text{т}})^2 = 0,1489$).

Следует отметить, что в последние годы получили распространение различного вида инфракрасные анализаторы (Infratec 1225, 1241; Инфраскан 3150, 4200), используемые для определения одного или нескольких показателей качества зерна пшеницы (влажности, содержания белка, крахмала, сырой клейковины и др.), исключая массу 1000 зерен. В рассматриваемом случае разработанное уравнение и его усовершенствованные аналоги (после определения массы 1000 зерен) могут быть использованы для косвенной проверки их точности при измерении содержания белка в зерне пшеницы.

Выводы. Усовершенствован метод прогноза содержания белка в зерне пшеницы по содержанию сырой клейковины и массе 1000 зерен, основанный на использовании уравнений множественной нелинейной регрессии. Предложенные уравнения могут быть использованы для прогноза практически во всех случаях, когда результаты анализа содержания сырой клейковины в зерне пшеницы, а также масса 1000 зерен приводятся при фактической или фиксированной влажности, либо в пересчете на сухое вещество.

Литература.

1. Колмаков Ю. В. Оценка материала пшеницы в селекции и повышение потенциала его качества в зернопроизводстве и хлебопечении. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. С. 5–19.
2. Шаймерденова Д., Тастанбеков С. Метрологическое обеспечение качества зерна в Казахстане // *Хлебопродукты*. 2009. № 4. С. 49–51.
3. Бегеулов М. Ш. Статистический анализ технологических показателей качества зерна // *Агрехимия*. 2002. № 10. С. 68–73.
4. Драгавцев В. А. Генетика признаков продуктивности яровых пшениц в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1984. 230 с.
5. Макарова В. М. Структура урожайности зерновых культур и ее регулирование. Пермь: Пермская ГСХА, 1995. 143 с.
6. Иванова Т. И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 1989. С. 32–42.
7. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Особенности использования регрессионного анализа в агрохимических исследованиях // *Агрехимия*. 2022. № 10. С. 71–83. doi: 10.31857/S0002188122100088.
8. Сравнительная оценка различных методов прогноза содержания белка в зерне пшеницы / А. В. Пасынков, А. А. Завалин, Е. Н. Пасынкова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 3. С. 22–27. doi: 10.31857/s2500262721030054.
9. Пасынков А. В., Пасынкова Е. Н. Эффективность прогноза белковости зерна пшеницы // *Агрехимический вестник*. 2022. № 5. С. 86–92. doi: 10.24412/1029-2551-2022-5-017.
10. Особливості формування урожайності і якості зерна озимої пшениці залежно від строків сівби та азотних підживлень / А. Д. Гирка, С. С. Ярошенко, І. І. Гасанова и др. // *Бюллетень Інституту зернового господарства*. 2010. С. 33–40.
11. Foto Kashta. Effect of nitrogen fertilizer level on the grain yield, some qualitative and technological indices of *Triticum aestivum* L. // *Albanian j. agric. sci.* 2014. P. 187–192.
12. Капустин С. И., Володин А. Б., Капустин А. С. Эффективность весенних подкормок аммиачной селитрой озимой пшеницы, посеянной после сорго на зерно // *Таврический вестник аграрной науки*. 2017. № 4 (12). С. 57–62.
13. Юшкевич Л. В., Пахотина И. В., Щитов А. Г. Эффективность использования агротехнологических приемов возделывания мягкой яровой пшеницы в повышении продуктивности и качества зерна в Омской области // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2021. № 7. С. 26–34. doi: 10.36718/1819-4036-2021-7-26-34.
14. Effect of seeding rates on productivity, technological and rheological characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / M. F. Seleiman, M. E. Ibrahim, S. M. Abdel-Aal, et al. // *International Journal of Current Research*. 2010. Vol. 4. P. 075–081.
15. The effectiveness of nitrogen-phosphorus fertilization in winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivation / P. Rusek, M. Mikos-Szymanska, M. Karsznia, et al. // *Bulgarian journal Agricultural Sciences*. 2016. No. 5 (22). P. 752–755.
16. Оценка технологических и хлебопекарных свойств новых линий яровой пшеницы / М. А. Кузьмич, И. Ф. Лапочкина, Н. Р. Гайнуллин и др. // *Инновационные разработки по селекции и технологиям возделывания сельскохозяйственных культур*. М.: ФИЦ «Немчиновка», 2018. С. 91–97.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к публикации 04.07.2023