

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕЛЬНОСМОЛОТОЙ МУКИ ИЗ ЗЕРНА РЖИ

М.Л. Пономарева, доктор биологических наук, **С.Н. Пономарев**, доктор сельскохозяйственных наук, **Г.С. Маннапова**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Л.Ф. Гильмуллина**, кандидат сельскохозяйственных наук

*Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение «Казанского научного центра Российской академии наук», 420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 48
E-mail: smponomarev@yandex.ru*

Исследования проводили с целью оценки показателей, определяющих хлебопекарные, функциональные и технологические свойства, а также выявление корреляционных связей между этими параметрами у ржаной цельносмолотой муки. Определяли 18 показателей хлебопекарных и реологических свойств с использованием разных методов оценки у 10 российских сортов озимой ржи. Дополнительно исследовали характеристики кривой набухания с применением амилографа Брабендера при температуре 30°C, вязкость водного экстракта (ВВЭ), содержание водорастворимых пентозанов и белка. Установлена высокая корреляция максимального набухания после выдержки при 30°C в течение 30 мин, с числом падения ($r = 0,85$), высотой амилограммы ($r = 0,90$) и вязкостью водного экстракта ($r = 0,94$), а также между ВВЭ и температурой клейстеризации ($r = 0,72$) и числом падения ($r = 0,82$). Наиболее значимыми показателями для включения в селекционные программы по созданию хлебопекарных и кормовых сортов озимой ржи можно считать следующие: число падения, вязкость водного экстракта, скорость набухания, содержание белка, содержание водорастворимых пентозанов, водопоглощительная способность, устойчивость теста и число качества фаринографа. На ранних этапах селекции для оценки цельносмолотой муки можно ограничиться только четырьмя характеристиками – число падения, скорость набухания, вязкость водного экстракта и число качества фаринографа. Методом главных компонент доказано, что между изучаемыми сортами имеются существенные различия по комплексу признаков, характеризующих их сырьевую ценность.

RESEARCH TECHNIQUES FOR THE QUALITY WHOLEMEAL RYE FLOUR

Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S., Gilmullina L.F.
*Tatar Scientific Research Institute of Agriculture, FRC Kazan Scientific Center of RAS,
420059, Kazan, Orenburgskii trakt, 48
E-mail: smponomarev@yandex.ru*

The research was carried out to evaluate the indicators determining the baking, functional and technological properties and to identify correlations between these parameters in wholemeal rye flour. We determined 18 parameters of baking and rheological properties using different evaluation methods in 10 Russian varieties of winter rye. In addition, the characteristics of the swelling curve were measured using Amylograph Brabender at 30°C, the water extract viscosity (VWE), the content of water-soluble pentosans and protein were evaluated. A high correlation was found between maximum swelling after incubation at 30°C for 30 min, with the falling number ($r = 0.85$), amylogram peak viscosity ($r = 0.90$) and VWE ($r = 0.94$), and between VWE and gelatinization temperature ($r = 0.72$) and the falling number ($r = 0.82$). The most significant indicators for inclusion in breeding programs for baking and fodder varieties of winter rye are: falling number, water extract viscosity, swelling rate, protein content, water-soluble pentosan content, water absorption capacity, dough stability and farinograph quality number. In the early stages of selection, for the evaluation of wholemeal flours only four characteristics can be limited – the falling number, swelling rate, water extract viscosity and the farinograph quality number. The principal component analysis also demonstrated that there are reliable differences between the rye varieties under study in terms of the set of traits that characterize their raw material value.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L.), цельносмолотая мука, тесто, амилограф, фаринограф, вязкость, число падения, набухание, клейстеризация

Key words: winter rye (*Secale cereale* L.), wholemeal flour, dough, amylograph, farinograph, viscosity, falling number, swelling, gelatinization

Рожь относится к важнейшим злаковым культурам, имеющим традиционную значимость в питании населения северного полушария Земли. Она играет важную агрономическую, пищевую и социальную роль на протяжении всей истории человеческой цивилизации [1]. Особое значение озимая рожь приобретает в условиях климатических аномалий (морозных зим и острозасушливых летних месяцев) как страховая культура, наиболее устойчивая к абиотическим стрессовым факторам [2, 3]. Ее агротехническая роль в адаптивно-ландшафтном земледелии в первую очередь связана с минимизацией производственных затрат, в особенности в регионах с малоплодородными почвами.

Посевные площади и валовые сборы зерна ржи в РФ за последнее десятилетие значительно сократились вплоть до рекордного минимума (846 тыс. га) в 2019 г., когда в стране возник дефицит зерна этой культуры при наименьшем производстве (1,43 млн т). Создание устойчивого рынка ржаного зерна в стране

во многом будет связано с развитием таких отраслей, как птицеводство и свиноводство, поскольку зерно составляет значительную часть кормовых ресурсов в животноводстве.

Основные химические составляющие зерна ржи такие же, как и у других злаков: белок, углеводы, минеральные вещества и витамины. Углеводы ржаной муки представлены крахмалом и некрахмальными гетерополисахаридами, которые в специализированной литературе чаще называют пентозанами или арабиноксиланами (АК). По разным источникам ржаное зерно содержит от 2,5 до 12,2 % АК от сухого вещества, по сравнению с 6...7 % в пшенице [4]. Арабиноксиланы принято относить к категории пищевых или диетических волокон. При близком общем количестве пентозанов содержание их водорастворимой фракции в зерне ржи примерно в 2 раза выше, чем у пшеницы. Озимая рожь содержит 73 % нерастворимых пищевых волокон, а доля растворимых составляет 27 % [5].

Устойчивый интерес к изучению АК ржи стимулируют многие функциональные свойства, которыми они характеризуются. В отношении здоровья человека АК положительно влияют на деятельность кишечника и обмен веществ, а также на количество, качество и состав кишечной микрофлоры. Питательные преимущества высокого потребления ржи включают положительное действие на пищеварение и снижение риска сердечных заболеваний, гиперхолестеринемии, ожирения и инсулиннезависимого сахарного диабета, а также защитный эффект против некоторых гормонозависимых типов рака [6].

Ржаная мука с хорошими хлебопекарными качествами должна характеризоваться высоким содержанием АК, а также высокой долей водорастворимой фракции, что положительно влияет на объем, формоустойчивость, структуру мякиша ржаного хлеба и замедление его черствения [7]. Хлебопекарный потенциал ржаной муки можно повысить при использовании пентозанов как тестоформирующих ингредиентов [8].

В то же время высокое содержание высокомолекулярных растворимых пентозанов – существенная помеха для использования зерна ржи на кормовые цели. Антипитательные свойства пентозанов обусловлены их значительной гидрофильностью, вследствие чего при растворении в воде из-за большой молекулярной массы они образуют гидроколлоиды с высокой вязкостью. Поэтому при значительных объемах ввода ржи в рацион происходит расстройство пищеварения животных и снижение переваримости питательных веществ.

Зерно ржи также содержит ферменты, в частности амилазы, которые разлагают крахмал и играют ключевую роль в определении хлебопекарных качеств муки [9].

Для определения качественных характеристик цельнозерновой муки используют различные методики и соответствующее оборудование. Качество крахмала и активность α -амилазы определяют величины числа падения (ЧП) и высоты амилограммы [10]. Параметры максимальной вязкости ржаной суспензии и температуру ее достижения, которая находится в диапазоне от 62 до 75°C, используют в качестве критериев оценки качества ржаной муки или шрота. Водопоглощение ржаной муки измеряют на фаринографе, позволяющем соотнести показатель качества с количеством воды, которое необходимо добавить в тесто, и определить экономически значимый выход теста и хлеба, получаемого из данного количества муки. Отсутствие образования клейковины в ржаном тесте повышает роль набухающих веществ как структурообразователя теста. Водопоглощение цельнозерновой ржаной муки и теста преимущественно зависит от содержания и свойств АК. Роль белков ржи в водопоглощении не столь существенна, по сравнению с пшеницей, поскольку среди белков ржи больше водорастворимых [11].

Еще один метод оценки свойств теста, связанных с содержанием АК и активностью ферментов деградации клеточной стенки, – тест на набухание [12]. Его редко напрямую применяют в практике российской селекции, поскольку нет исследований о возможности его использования для оценки хлебопекарных качеств ржаной муки вместо традиционных оценок амилографической вязкости.

Определение величины и структурных особенностей АК как важных детерминант биоактивности и технологических функций зерна ржи пока остается научной проблемой. Связь количества водорастворимой фракции арабиноксиланов и ее вязкостных свойств как

важных тестоформирующих ингредиентов с другими хлебопекарными и технологическими свойствами зерна полностью не изучена.

Цель исследований – оценка проявления показателей, определяющих хлебопекарные, функциональные и технологические свойства, и выявление корреляционных связей между этими параметрами у ржаной цельнозерновой муки.

Методика. Для исследования использовали зерно ржи, собранное в полевых опытах Татарского НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, расположенных в Лаишевском районе Республики Татарстан (урожай 2016 – 2018 гг.). Объектами изучения служили современные российские сорта озимой ржи как собственной селекции (Татарская 1, Эстафета Татарстана, Радонь, Огонек, Тантана, Подарок, Зилант, Популяция 17), так и других селекционных учреждений (Парча, Памяти Кунакбаева). Каждый сорт выращивали на делянках общей площадью 16 м² (учетная площадь 12 м²) в четырехкратной повторности в соответствии с требованиями Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур.

Размол пробы зерна массой 300 г с целью получения шрота (цельноизмельченное зерно со 100 %-ным выходом с различным сочетанием частиц разного размера) осуществляли на лабораторной мельнице Perten Instruments Laboratory Mill 3100 (Швеция) с размером сита 0,8 мм согласно ГОСТ 13586.5-85.

Всего оценивали 18 параметров, характеризующих качество зерна и его сырьевую ценность. Число падения определяли стандартным методом ISO 3093 (2009) на приборе Falling Number 1500 (Hagberg-Perten, Германия). Для анализа свойств клейстеризации крахмала использовали оборудование Amylograph Brabender OHG (Германия, ГОСТ ISO 7973-2013), на котором оценивали начальную и максимальную вязкость суспензии в единицах амилографа (е.а.), а также температуру клейстеризации (начальная и максимальная) в градусах Цельсия. Еще один метод оценки свойств теста, связанных с содержанием фракции АК и активностью ферментов деградации клеточной стенки, – характеристика набухания водношротовой суспензии (swelling test) [13]. Для построения кривых набухания на амилографе использовали навеску из 130 г ржаной муки (14 %-ной влажности), которую смешивали с 400 см³ дистиллированной воды (температура 32...33°C) в мерном цилиндре. Добавление воды проводили медленно при непрерывном перемешивании до образования однородной суспензии, которую затем помещали в чашу амилографа. После этого датчик терморегулятора устанавливали на 30°C и отключали привод терморегулятора для того, чтобы регистрация процесса набухания (в виде кривой) происходила при этой температуре в течение 30 минут. По кривой набухания определяли следующие характеристики: начальное и максимальное набухание (в единицах прибора), время набухания в минутах, скорость набухания (ед. амилографа/мин.).

Реологические свойства теста оценивали на фаринографе фирмы Brabender в соответствии со стандартным методом ICC 115/1. Размол зерна, предшествующий этому анализу, осуществляли на мельнице CHOPINCD1 (Франция), стандартизированной ААСС 26-70.01 для его проведения. Фаринографические характеристики анализировали с использованием навески из 200 г цельнозерновой ржаной муки (в пересчете на влажность 14 %), которую смешивали с дистиллированной водой в 300-граммовой термостатируемой тестомесильной чаше фаринографа до конечной консистенции теста 300±10 единиц фаринографа после 10 мин вымешивания [14]. Динамику вязко-

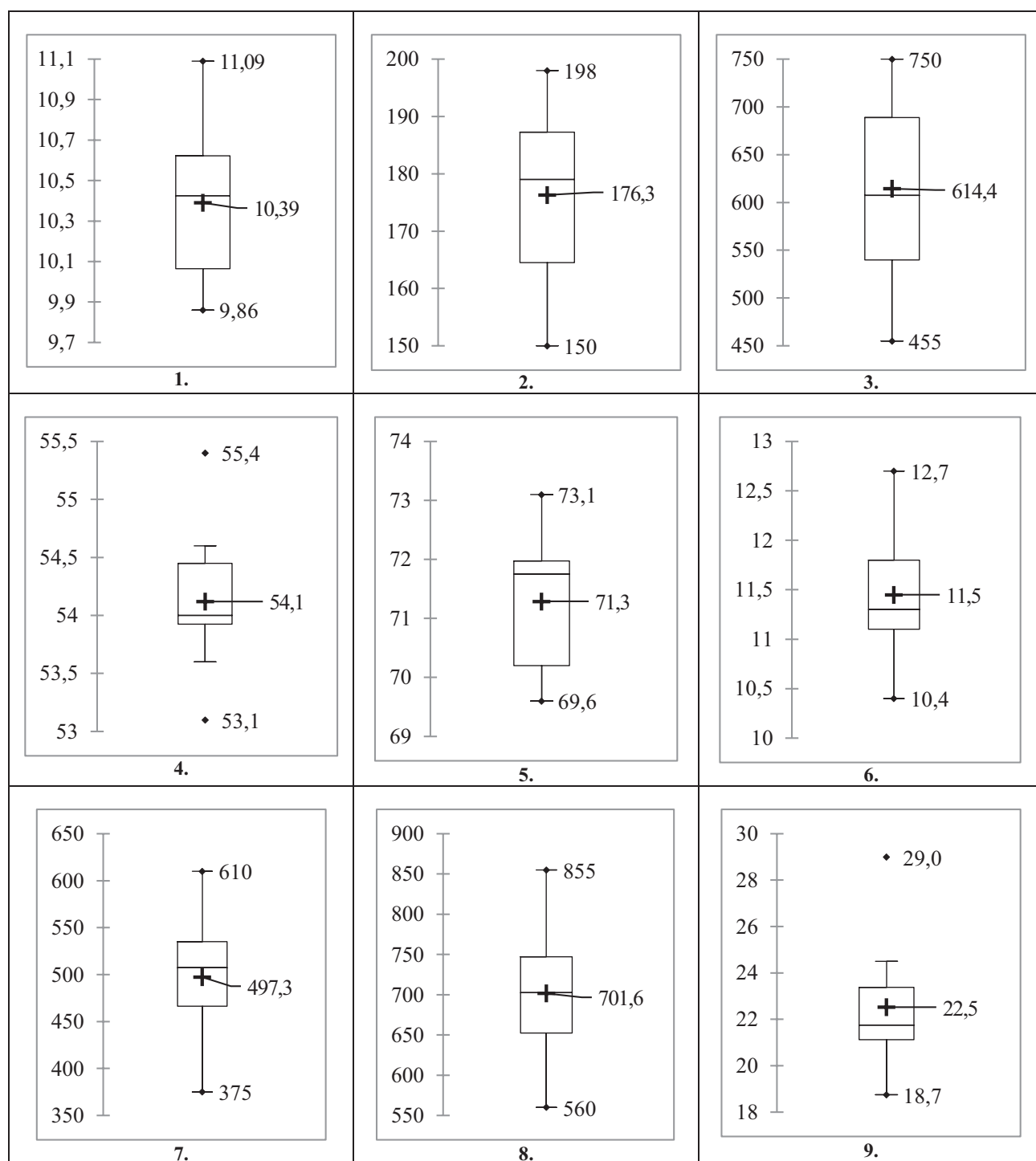


Рис. 1. Диаграмма размаха Тьюки показателей, характеризующих хлебопекарные качества цельнозерновой муки и реологические качества теста сортов озимой ржи: 1 – содержание белка в зерне, %; 2 – число падения, с; 3 – высота амилограммы, е.а; 4 – температура начала клейстеризации, °С; 5 – температура пика клейстеризации, °С; 6 – время клейстеризации, мин.; 7 – начало набухания, е.а; 8 – максимальное набухание, е.а; 9 – время набухания, мин.

эластичных свойств теста контролировали по следующим признакам: водопоглотительная способность (ВПС) (%); время образования теста (минуты); устойчивость теста при замесе (минуты); степень разжижения теста (единицы фаринографа); число качества фаринографа (ЧКФ) (мм); валориметрическая оценка (%).

Для определения содержания водорастворимых пентозанов (СВП) и вязкости водного экстракта (ВВЭ) ржаного шрота проводили экстрагирование цельнозерновой

муки дистиллированной водой при температуре 30°С в течение 60 минут согласно методике, описанной D. Boros et al. [15]. Соотношение шрота и воды – 1:5. ВВЭ определяли вискозиметрическим методом на отечественном оборудовании (ВПЖ-1, диаметр капилляра 1,52 мм). Для расчета ВВЭ в сантистоксах использовали формулу: $V = g/9,807 \cdot T \cdot K$, где V – кинематическая вязкость, мм²/с; g – ускорение свободного падения в месте измерения, м/с²; T – время истечения жидкости, с; K – постоянная

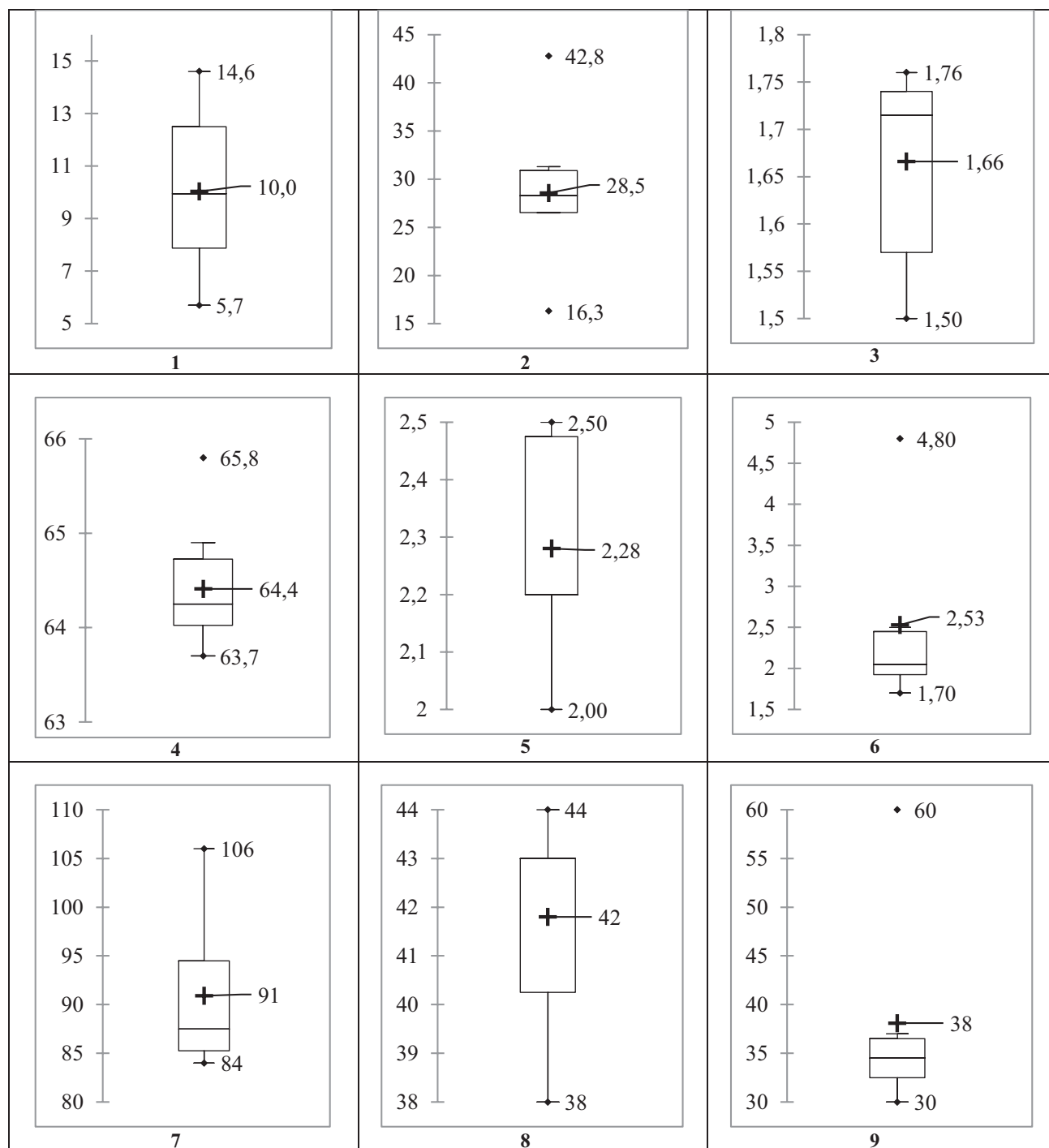


Рис. 2. Диаграмма размаха Тьюки 18 показателей, характеризующих хлебопекарные качества цельнозерновой муки и реологические качества теста сортов озимой ржи: 1 – скорость набухания, е.а/мин.; 2 – вязкость водного экстракта, сСт; 3 – содержание водорастворимых пентозанов, %; 4 – водопоглотительная способность теста, %; 5 – время образования теста, мин.; 6 – устойчивость теста, мин.; 7 – степень разжижения теста, е.ф.; 8 – валориметрическая оценка, %; 9 – число качества фаринографа, мм.

вискозиметра, мм²/с²; согласно методике [16]. СВП измеряли адаптированным для зерна ржи биохимическим микрометодом с использованием орцинового реактива [17, 18]. Содержание белка анализировали методом Кьельдаля (АОАС 984.13).

Статистическую обработку данных проводили с применением многомерных методов статистического анализа (главных компонент, кластерный анализ) на платформе XL STAT 2018.6.54644.

Результаты и обсуждение. Качество ржаной муки, используемой для хлебопечения, основано на количестве и функциональных свойствах составляющих ее веществ. Цельнозерновая мука ржи, несмотря на растущий интерес к ней в связи с тенденциями здорового питания, слабо оценена по качественным характеристикам, хотя она принципиально отличается от сеяной муки по количественному содержанию отрубей, липидов, белка и размеру частиц.

Мукомолы рассчитывают на собственные методы оценки партий озимой ржи для гарантированного обеспечения мукой соответствующего качества. Хлебопеки полагаются на свои одобренные методы для различных технологий хлебопечения. Селекционеры при создании сорта должны учитывать многочисленные апробированные методы с целью получения объективных данных, определяющих сырьевую ценность, для оценки и отбора лучших сортов с учетом различных потребностей как мукомольного, так и хлебопекарного производства. Причем в зависимости от конечного использования того или иного сорта в программе селекции следует применять контрастные критерии отбора и надлежащее оборудование.

Согласно результатам наших предыдущих исследований [19], изучаемые сорта озимой ржи имели значимые различия по технологическим и хлебопекарным свойствам, а из совокупности реологических характеристик достоверно отличались только по устойчивости теста и оценке качества по фаринографу. Продолжая эту работу, мы проанализировали комплекс прямых и косвенных параметров, характеризующих качество цельнозерновой муки и теста на ее основе, для выявления системы показателей, наиболее приемлемых для селекционной практики.

Результаты анализа блочных диаграмм (рис. 1, 2), которые демонстрируют разброс значений по каждому из изучаемых признаков у группы из 10 исследованных сортов указывают на то, что межквартильный размах, соответствующий величине ящика, и отношения крайних вариант, заметно различались по показателям, достигая

по отдельным параметрам (скорость набухания, ВВЭ, устойчивость теста, ЧКФ) двукратных размеров (см. рис. 2). Медианные значения таких параметров муки и теста, как температура начала и время клейстеризации, время набухания, ВПС, время образования, устойчивость и степень разжижения теста, оказались ниже средних значений, что свидетельствует о неоднородности сортов по перечисленным характеристикам. «Выбросы» (точки вне блоков), наблюдаемые на диаграммах, по признакам температура начала клейстеризации, время набухания, ВВЭ, ВПС, устойчивость теста и ЧКФ свидетельствуют о том, что отдельные сорта в сильной степени отличались от основной выборки.

При анализе взаимосвязей между качественными характеристиками цельнозерновой муки и теста выявлено 29 пар со значимыми коэффициентами корреляции (табл. 1). Как и ожидалось, ЧП показало высокую положительную корреляцию с максимальной вязкостью по амилографу ($r = 0,84$) и температурой при достижении пиковой вязкости ($r = 0,91$). Содержание белка не коррелировало с амилографическими характеристиками. Отмечена достоверная и положительная корреляция между временем клейстеризации и числом падения, высотой амилограммы, температурой пика клейстеризации ($r = 0,77; 0,78; 0,85$ соответственно).

Отмечена высокая корреляция параметров кривой набухания, а именно максимального набухания после выдержки при 30°C в течение 30 мин, с числом падения, максимальной высотой амилограммы и вязкостью водного экстракта (0,85; 0,90; 0,94 соответственно). Такие же сильные связи (незначительно отличающиеся по

Табл. 1. Матрица коэффициентов парной корреляции признаков качества зерна ржи, ржаного шрота и теста

Признак*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00																	
2	-0,50	1,00																
3	-0,18	0,84	1,00															
4	-0,17	0,50	0,28	1,00														
5	-0,28	0,91	0,81	0,53	1,00													
6	-0,22	0,77	0,78	0,00	0,85	1,00												
7	0,00	0,55	0,55	0,13	0,42	0,42	1,00											
8	-0,09	0,85	0,90	0,30	0,80	0,76	0,76	1,00										
9	0,08	-0,24	0,03	0,12	-0,07	-0,16	-0,62	-0,30	1,00									
10	0,17	0,68	0,80	0,20	0,83	0,86	0,55	0,85	-0,17	1,00								
11	-0,09	0,82	0,90	0,18	0,72	0,74	0,66	0,94	-0,29	0,77	1,00							
12	0,25	0,29	0,25	0,49	0,24	-0,03	0,66	0,37	-0,44	0,28	0,34	1,00						
13	0,33	0,24	0,38	0,21	0,50	0,46	0,40	0,40	0,11	0,63	0,18	0,30	1,00					
14	0,38	0,32	0,38	-0,14	0,37	0,53	0,25	0,53	-0,36	0,60	0,66	0,10	0,07	1,00				
15	-0,69	0,38	0,12	0,24	0,06	-0,07	0,26	0,09	-0,40	-0,22	0,18	0,32	-0,53	-0,30	1,00			
16	0,17	-0,40	-0,05	-0,10	-0,53	-0,56	-0,17	-0,20	0,46	-0,41	-0,15	-0,13	-0,31	-0,34	-0,02	1,00		
17	-0,24	0,28	-0,19	0,12	0,33	0,31	0,08	0,06	-0,56	0,15	0,01	0,03	0,00	0,30	0,11	-0,90	1,00	
18	-0,60	0,35	0,14	0,19	0,03	-0,08	0,25	0,08	-0,38	-0,23	0,22	0,38	-0,55	-0,21	0,98	0,00	0,07	1,00

*1 – содержание белка в зерне, 2 – число падения, 3 – высота амилограммы, 4 – температура начала клейстеризации, 5 – температура пика клейстеризации, 6 – время клейстеризации, 7 – начало набухания ржаного шрота при 30 °С, 8 – максимальное набухание ржаного шрота при 30 °С после выдержки в течение 30 минут, 9 – время набухания ржаного шрота, 10 – скорость набухания ржаного шрота, 11 – вязкость водного экстракта ржаного шрота, 12 – содержание водорастворимых пентозанов в ржаном шроте, 13 – водопоглотительная способность теста, 14 – время образования теста, 15 – устойчивость теста, 16 – степень разжижения теста, 17 – валориметрическая оценка теста, 18 – число качества фаринографа. Критическое значение коэффициента корреляции $r=0,63$, жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

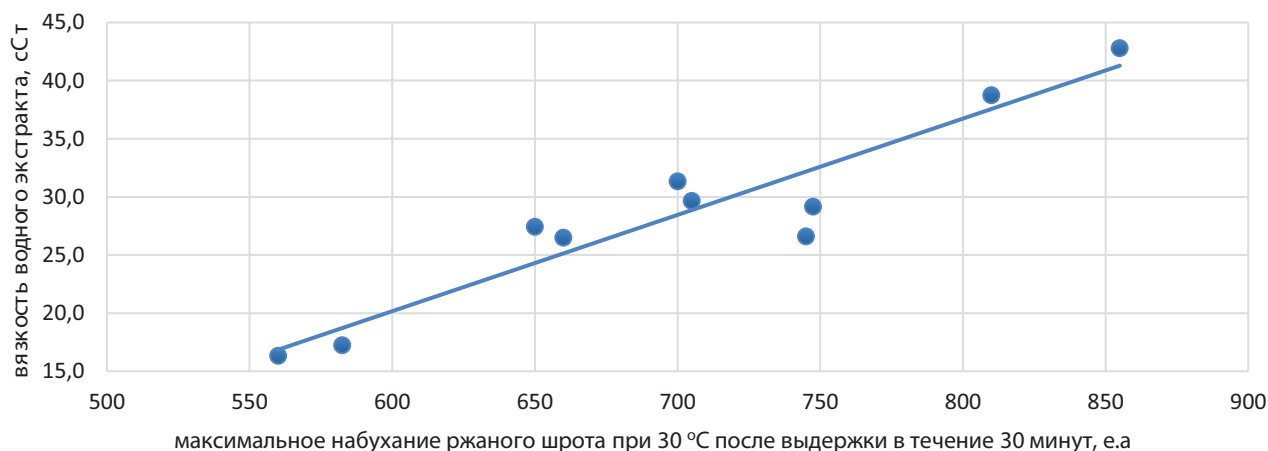


Рис. 3. Зависимость между вязкостью водного экстракта и тестом на набухание.

величине коэффициента корреляции) с теми же параметрами обнаружены у показателя ВВЭ. Наиболее тесные корреляционные связи отмечены между начальным набуханием и показателями максимального набухания, вязкости водного экстракта и содержанием водорастворимых пентозанов (см. табл. 1).

Водопоглотительная способность муки зависит от ее водосвязывающей способности и определяет выход теста и количество воды, добавляемой при приготовлении теста. Водопоглощение значимо положительно коррелировало со скоростью набухания ($r = 0,63$), время образования теста – с ВВЭ ($r = 0,66$). Отмечена достоверная отрицательная корреляция между валориметрической оценкой теста и степенью его разжижения ($r = -0,91$). Показатель начала набухания при 30°C имел высокую связь с максимальным набуханием, ВВЭ и СВП. Устойчивость теста, характеризующая продолжительность сохранения максимального уровня консистенции замешиваемого теста, находилась в значимой отрицательной сопряженности с содержанием белка ($r = -0,69$) и высокой положительной корреляции с показателем качества фаринографа ($r = 0,98$).

Таким образом, структуру комплекса «ржаной шрот–вода» определяет взаимовлияние многих компонентов, от которых зависят хлебопекарные качества зерна ржи и качество конечного продукта – ржаного хлеба.

Проверка корреляционной зависимости между ВВЭ, определенной на капиллярном вискозиметре, с максимальным набуханием (конечная вязкость на кривой набухания) после выдержки при 30°C в течение 30 мин. показала, что вязкость водного экстракта положительно и достоверно коррелирует с максимальным набуханием ржаного шрота (рис. 3). Уравнение линейной регрессии имеет следующий вид: $y = 0,0828x - 29,536$.

ВВЭ может служить эффективной оценкой для измерения вязких свойств растворов из цельнозерновой муки и определения связи функциональности со структурными свойствами. Аналогичные подходы предложены и другими авторами [20]. Популяции ржи с высокой вязкостью обладали лучшими хлебопекарными характеристиками, чем популяции с низкой вязкостью. По данным А.А. Гончаренко с соавторами [21] они превосходили другие сорта по числу падения (на 90 с), высоте амилограммы (на 328 е.а), температуре клейстеризации (на 2,5°C).

Поэтому в работе был сделан акцент на анализе наиболее дифференцирующих показателей количества арабиноксиланов и их вязких свойств, определяемых

как прямыми химическими методами, так и с использованием косвенных оценок через набухаемость, вязкость водного экстракта и водопоглотительную способность. Если по ВВЭ результатов исследований в отечественной литературе довольно много [2, 22], то оценку на набухание практически не используют для характеристики цельнозерновой муки.

На дендрограмме кластерного анализа (рис. 4) по оси абсцисс отложены номера, присвоенные определенному признаку в порядке их сходства; по оси ординат – линии, отражающие расстояния между этими объектами. Разрезание дендрита по выбранному уровню сходства (расстоянию) приводит к выделению наиболее сход-

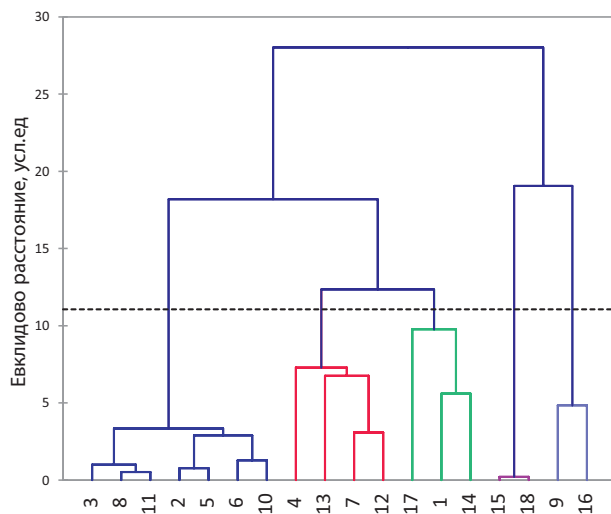


Рис. 4. Дендрограмма признаков качества зерна и теста сортов озимой ржи. Номерами обозначены следующие показатели: 1 – содержание белка в зерне, 2 – число падения, 3 – высота амилограммы, 4 – температура начала клейстеризации, 5 – температура пика клейстеризации, 6 – время клейстеризации, 7 – начало набухания ржаного шрота при 30°C, 8 – максимальное набухание ржаного шрота при 30°C после выдержки в течение 30 минут, 9 – время набухания ржаного шрота, 10 – скорость набухания ржаного шрота, 11 – вязкость водного экстракта ржаного шрота, 12 – содержание водорастворимых пентозанов в ржаном шроте, 13 – водопоглотительная способность теста, 14 – время образования теста, 15 – устойчивость теста, 16 – степень разжижения теста, 17 – валориметрическая оценка теста, 18 – число качества фаринографа.

ных групп объектов. В нашем исследовании в первый укрупненный кластер вошли ВВЭ, скорость набухания, высота амилограммы, максимальное набухание, число падения, температура и время клейстеризации. Два первых из них характеризуются значительной генотипической вариацией и могут быть использованы как селекционные критерии.

Во второй кластер сгруппировались температура начала клейстеризации, начало набухания, водопоглотительная способность, СВП, содержание белка и время образования теста. При механической нагрузке сначала происходит непрерывное снижение вязкости ржаного теста. Этому феномену, прежде всего, способствует расщепление протеинов. Конечно, в этих изменениях играют роль и пентозаны, но дело, скорее всего, в реакциях между протеинами и пентозанами. Но процесс до конца не выяснен, а потому определенно требует дальнейших исследований.

В третий кластер были объединены 4 показателя – устойчивость теста, показатель качества фаринографа, время набухания и степень разжижения. Эти признаки демонстрируют водосвязывающую и водоудерживающую роль АК. Длинные молекулы растворимых пентозанов представляют собой разветвленную сеть, которая обладает высокой абсорбирующей способностью и образует клейкие гелеобразные растворы. От количества и структуры этой сети зависит процесс образования и консистенция теста.

Как правило, в селекционных исследованиях, в первую очередь, внимание обращают на ферментативную активность α -амилазы при высоких температурах, которую регистрируют на амилографе и приборе для измерения числа падения (признаки первого кластера). Величины этих показателей позволяют прогнозировать состояние крахмала в зерне или муке и его расщепляемость. Повышенное действие амилазы приводит к тому, что значительная часть крахмала в процессе брожения и выпечки гидролизует, этот процесс сопровождается образованием большого количества низкомолекулярных декстринов. В результате крахмал и пентозаны в тесте не связывают всю воду, а наличие свободной влаги делает мякиш ржаного хлеба липким и заминающимся.

Важно отметить, что такой признак 1 кластера, как скорость набухания водно-шротовой суспензии, определяемый при анализе амилографических кривых без нагревания при константной температуре 30°C в течение 30 минут, также отличался существенной межсортной вариацией (см. рис. 2). Этот показатель дополнительно подтверждает различия в поведении и структурных особенностях водорастворимых АК, действие которых благодаря разветвленной конфигурации направлено на связывание воды и клейстеризацию растворов. При температуре более 30°C происходят разрывы водородных связей в молекулах крахмала, ведущие к изменению его микроструктуры. Одновременно формируются оптимальные условия для действия многих ферментов, в том числе катализирующих реакцию гидролиза высокомолекулярных и нерастворимых АК. Следовательно, скорость набухания служит важным критерием влияния водорастворимых пентозанов и должна учитываться в селекционных программах.

Из признаков, сгруппированных во второй кластер, помимо содержания белка, внимание следует обратить на СВП и ВПС. Изменение вязкости набухающего, а затем клейстеризующегося крахмала оказывает значительное влияние на формирование мякиша хлеба. Теоретически доказано, что хлебопекарные достоинства ржаной муки в отличие от пшеничной можно полностью

сохранить даже при полном удалении запасных белков зерна. Это обусловлено тем, что составляющими тестоведения служат водорастворимые пентозаны [23, 24]. Это отличает ржаное тесто от пшеничного, в котором за удержание газов и свойства мякиша ответственны клейковинные белки. Высокая водопоглотительная способность определяет поведение теста при технологических операциях и характеризует мукомольные качества зерна сортов озимой ржи. В тонко размолотой ржаной муке в отличие от цельносмолотой (грубого помола) водопоглотительная способность будет выше из-за большей суммарной площади и мелкого размера частиц, способных коллоидно связывать воду в процессе замеса теста, при этом газодерживающая способность уменьшается.

Из показателей 3 кластера, по нашему мнению, наиболее важными признаками для селекции служат показатели устойчивости теста и ЧКФ. Первый параметр фиксирует время, в течение которого его консистенция остается неизменной, при этом более высокое значение показывает, что коллоидам муки требуется больше времени для полной гидратации из-за повышенной водопоглотительной способности АК. Это, очевидно, увеличивает время, необходимое для гомогенизации всех ингредиентов и их интеграции в стабильную структуру теста. Показатель качества фаринографа комплексно характеризует реологические свойства теста, обусловленные различной способностью арабиноксилановой фракции ржи к быстрой гидратации и удержанию воды в связанном состоянии. С прикладной точки зрения он фиксирует структуру, равновесие и эластичность теста, которые непосредственно влияют на эффективность технологии хлебопечения.

Далее к матрице корреляции был применен анализ главных компонент (РСА). Особенность этого метода заключается в том, что он позволяет выявить возможные различия по степени важности между отдельными признаками (рис. 5), когда не принимаются во внимание различия между сортами, и, наоборот, между сортами (рис. 6) без учета разноименных признаков, когда все параметры учитываются в равной степени. Кроме того, РСА позволяет визуализировать изучаемые переменные в системе координат для совместного анализа взаимосвязанных характеристик.

Суммарный процент объясненной дисперсии в нашем исследовании был равен 60,4 % (см. рис. 5).

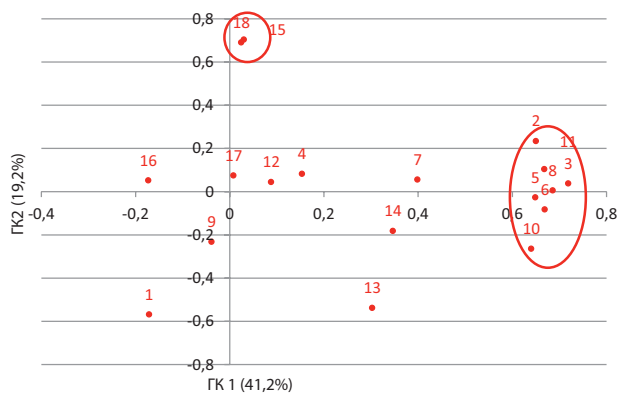


Рис. 5. Распределение 18 качественных признаков 10 сортов ржи на плоскостях в координатах 1 и 2 (ГК1 и ГК2) главных компонент, рассчитанных по методу РСА: ГК1 – 41,2 % объясненной дисперсии, ГК2 – 19,2 % объясненной дисперсии, 1...18 – номера признаков, показанных на рис. 4.

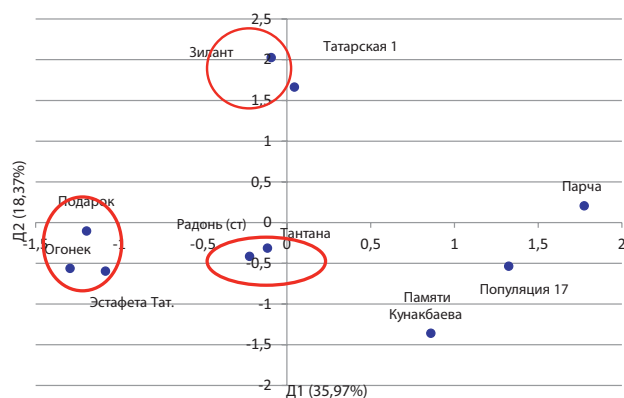


Рис. 6. Распределение 10 сортов ржи по 18 качественным признакам на плоскостях в координатах 1 и 2 (D1 и D2) главных компонент, рассчитанных по методу РСА с варимакс-вращением (D1 – 35,97 % объясненной дисперсии, D2 – 18,37 % объясненной дисперсии).

Установлено, что в первой координатной четверти довольно «кучно» расположены 7 признаков. Согласно приведенным данным, они автокомпенсаторные. При этом часть из этих признаков представляется избыточной, их предлагается отсеять, оставив только три: число падения, скорость набухания и вязкость водного экстракта. Это приведет к совершенствованию селекционного процесса на качество зерна, особенно на ранних этапах селекции. Первая детерминанта раскрывает ретроградацию крахмала амилолитическими ферментами, вторая определяет поведение и структурные особенности экстрагируемых водой АК. Третий признак (ВВЭ) служит результирующим показателем многих свойств: количества пентозанов, их растворимости, водосвязывающей и водоудерживающей способности, молекулярного веса и др. Поэтому в зависимости от имеющейся приборно-аналитической базы можно предложить ряд таких сочетаний признаков, полезных для оценки сырьевой пригодности сортов: 2+11, 3+11, 2+10, 3+10, 8+10 (номера признаков представлены на рис. 4).

На графике распределения 18 качественных признаков 10 сортов ржи на плоскостях в координатах 1 и 2 (ГК1 и ГК2) главных компонент (см. рис. 5) практически совпали два показателя: устойчивость теста и число качества фаринографа. Поэтому возможно использовать только один показатель – ЧКФ, который дает обобщенную информацию о качестве теста, включая его характеристики по времени образования, устойчивости к замесу, степени разжижения. Кроме того, он, в отличие от других показателей, регистрируемых на фаринографе, хорошо дифференцирует сорта. Остальные признаки довольно равномерно расположены в системе координат, потому для их редукции требуется проверка на генетически более разнообразном материале.

Анализ распределения сортов озимой ржи в многомерном пространстве указывает, что наверху координатной плоскости близко расположены сорта Татарская 1 и Зилант с высоким СВП, ВВЭ и показателями, характеризующими амилолитические свойства муки. Это сорта – улучшители, стабильно проявляющие свои высокие хлебопекарные свойства в разные годы. Их зерно может быть использовано для «исправления» качества зерна и/или муки с недостаточными хлебопекарными кондициями. В центре биplot-графика расположены сорта Радонь и Тантана с оптимальными хлебопекарными характеристиками, зерно которых для хлебопечения может использоваться в «чистом виде».

Сорта Огонек, Подарок и Эстафета Татарстана сгруппированы в блок с лучшими кормовыми достоинствами, а также возможностью использования в спиртоварении. Они характеризуются низкими показателями ВВЭ и СВП. Отдельными точками на графике отображены сорта Памяти Кунакбаева, Популяция 17 (новый сорт нашей селекции) и Парча. Вероятно, они отличаются от ранее названных по тем или иным показателям или их сочетанию. Следует отметить, что положительная и отрицательная области пространства во многом условны и имеют, скорее, математическое, чем биологическое значение. Важным представляется тот факт, что выявленные классы сортов не перекрываются и располагаются в разных областях двумерной плоскости, что свидетельствует о достоверных различиях между ними.

Таким образом, качественные характеристики цельносмолотой ржаной муки определяются большой группой свойств и структурных составляющих зерна. Число падения и амилографические характеристики дают ценную информацию о степени клейстеризации крахмала под влиянием амилолитических ферментов. Содержание водорастворимых пентозанов характеризует водопоглотительную способность различных компонентов набухания ржаной муки, а структурные особенности и растворимость – наиболее важные вязкостные свойства. Вязкость водного экстракта на основе ржаного шрота – ключевой параметр для характеристики такой системы. Ее количественная выраженность влияет как на выбор методики тестоведения, так и на определение пригодности зерна разных сортов озимой ржи для переработки.

Оценка 10 сортов озимой ржи российской селекции по 18 показателям хлебопекарных и реологических свойств с использованием разных методов оценки выявила ряд наиболее значимых критериев для включения в селекционные программы: число падения, вязкость водного экстракта, скорость набухания, содержание белка, содержание водорастворимых пентозанов, водопоглотительная способность, устойчивость теста и число качества фаринографа. Выявлены 3 кластера характеристик качества зерна, по которым в дальнейшем следует вести селекционную работу по созданию хлебопекарных и кормовых сортов озимой ржи. На ранних этапах селекции для оценки цельносмолотой муки можно ограничиться только четырьмя характеристиками – число падения, скорость набухания, вязкость водного экстракта и число качества фаринографа. В результате анализа методом главных компонент также доказано, что между изучаемыми сортами имеются достоверные различия по комплексу признаков, характеризующих их сырьевую ценность.

Литература

1. Korzun V., Ponomareva M.L., Sorrells M.E. Economic and Academic Importance of Rye // *The Rye Genome* / eds. M.T. Rabanus-Wallace, N. Stein. 2021. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-83383-1_1 (дата обращения: 05.02.2022). doi: 10.1007/978-3-030-83383-1_1.
2. Гончаренко А.А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. М.: Московский НИИСХ, 2014. 372 с.
3. Сравнительная оценка сортов озимой ржи по хозяйственно-биологическим показателям / Т.Я. Ермолаева, Н.Н. Нуждина, Д.В. Говердов и др. // *Успехи современного естествознания*. 2019. №. 7. С. 14-20.
4. Grain characteristics, chemical composition, and functional properties of rye (*Secale cereal L.*) as

- influenced by genotype and harvest year / H.B. Hansen, B. Møller, S.B. Andersen, et al. // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2004. Vol. 52. No. 8. P. 2282-2291.
5. Content, and molecular weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread / R. Andersson, G. Fransson, M. Tietjen, et al. // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2009. Vol. 57. No. 5. P. 2004–2008.
 6. Rye and health—Where do we stand and where do we go? / K. Jonsson, R. Andersson, K.E.B. Knudsen, et al. // *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 79. P. 78–87.
 7. Bastos R., Coelho E., Coimbra M.A. Arabinoxylans from cereal by-products: Insights into structural features, recovery, and applications // *Sustainable Recovery and Reutilization of Cereal Processing By-Products*. Woodhead Publishing, 2018. P. 227-251.
 8. Красильников В.Н. Актуальные направления использования генетических ресурсов растений в пищевой инженерии продуктов функционального и специализированного назначения // *Аграрная Россия*. 2015. №11. С. 36–42. doi: 10.30906/1999-5636-2015-11-36-42.
 9. Németh R., Tömösközi S. Rye: Current state and future trends in research and applications // *Acta Alimentaria*. 2021. Vol. 50. No. 4. P. 620-640. doi: 10.1556/066.2021.00162
 10. Drews E., Seibel W. Bread-baking and other uses around the world // *Rye: Production, chemistry, and technology*. 1976. P. 127-178.
 11. Sapirstein, H.D., Bushuk, W. Rye grain: its genetics, production, and utilization. In: Corke, H., Seetharaman, K., and Wrigley, C. (Eds.) // *Encyclopedia of food grains*. Oxford: Academic Press, 2016. P. 159–167. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.00017-2.
 12. Prediction of rye flour baking quality based on parameters of swelling curve / S. Stepniewska, E. Slowik, G. Cacak-Pietrzak et al. // *European Food Research and Technology*. 2018. Vol. 244. No. 6. Pp. 989-997.
 13. Rye bread defects: analysis of composition and further influence factors as determinants of dry-baking / M. Oest, U. Bindrich, A. Voß, et al. // *Foods*. 2020. Vol. 9. No. 12. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/12/1900> (дата обращения: 12.02.2022). doi:10.3390/foods9121900.
 14. Kim M.Y., Freund W., Chun S.S. Determining the Water Absorption and Rheological Properties of Rye Dough Made Using the Planetary Mixer P 600 // *Food Science and Biotechnology*. 2009. Vol. 18. No. 2. P. 456-462.
 15. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosans content in rye / D. Boros, R.R. Marquardt, B.A. Slominski et al. // *Cereal Chemistry*. 1993. Vol. 70. Pp. 575-580.
 16. Изучение содержания пентозанов в зерне популяционных сортов озимой ржи различными методами / М.Л. Пономарева, С.Н. Пономарев, Л.Ф. Гильмуллина и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. №. 12. С.10-13.
 17. Hashimoto S., Shogren M.D., Pomeranz Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products // *Cereal chem*. 1987. Vol. 64. No. 1. P. 30-34.
 18. Delcour J.A., Vanhamel S., De Geest C. Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. I. Colorimetric analysis of pentosans and their relative monosaccharide compositions in fractionated (milled) rye products. // *Cereal chem*. 1989. Vol. 66. No. 2. P. 107-111.
 19. Структурно-функциональная характеристика пентозанов муки и теста сортов озимой ржи / М.Л. Пономарева, С.Н. Пономарев, Г.С. Маннапова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. №. 8. С. 33-37. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10807
 20. Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Теоретические основы селекции зернофуражной ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов // *Сельскохозяйственная биология*. 2013. №. 2. С. 31-39.
 21. Multiple divergent selection on viscosity of a water extract of winter rye / A.A. Goncharenko, S.A. Ermakov, A.V. Makarov et al. // *Russian agricultural sciences*. 2016. Vol. 42. No. 5. P. 289–294. doi: 10.3103/S1068367416050074
 22. Генотипическая изменчивость содержания пентозанов в зерне озимой ржи / М.Л. Пономарева, С.Н. Пономарев, М.Ш. Тагиров и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т.52. № 5. С. 1041-1048. doi: 10.15389/agrobiology.2017.5.1041rus
 23. Adaptivity of Winter Rye Varieties Based on Rheological Properties of Aqueous Meal Slurry / T.Ya. Ermolaeva, N.N. Nuzhdina, D.V. Goverdov et al. // *Russian Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 47. No. 5. P. 466-472.
 24. Влияние водорастворимых пентозанов на хлебопекарные свойства озимой ржи / Е.Н. Шаболкина, А.А. Бишарев, Н.В. Анисимкина и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2019. №. 1. С. 49-51. doi: 10.31367/2079-8725-2019-61-1-49-51.

Поступила в редакцию 13.05.2022
 После доработки 01.06.2022
 Принята к публикации 27.06.2022