

## Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи

М.А. Пономарева<sup>1, 2</sup>✉, С.Н. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

✉ e-mail: smponomarev@yandex.ru

Цель настоящей работы – оценить фенотипическую изменчивость показателей качества зерна и выявить комплекс наиболее информативных признаков для селекции разнообразных по направлению использования сортов озимой ржи. Исследования выполнены в Татарском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – обособленном структурном подразделении Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» в 2001–2015 гг. на 15 сортах озимой ржи. Оценены 20 параметров, определяющих качество зерна и сырьевую ценность: технологические показатели (масса 1000 зерен, натурная масса и выравненность зерна), параметры устойчивости к прорастанию зерна (число падения, высота амилограммы, температура пика клейстеризации крахмала), кинематическая вязкость водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота, хлебопекарные свойства (органолептическая оценка пробной выпечки хлебцев). Наибольшее влияние генотипа выявлено по ВВЭ (34.8 %) и содержанию белка (27.8 %). Эти признаки должны быть в первую очередь предметом фенотипической оценки в селекционном процессе. Фенотипическая изменчивость критериев углеводно-амилазного комплекса и активности α-амилазы и технологических параметров определялась преимущественно (68.6 ... 82.5 %) средовыми факторами. Между числом падения (ЧП) и содержанием белка отсутствовала значимая связь. ЧП существенно коррелировало с высотой амилограммы и температурой пика клейстеризации. Выявлена положительная сопряженность средней силы ВВЭ с высотой амилограммы и ЧП. На основании многолетней фенотипической оценки с помощью метода главных компонент проведена оптимизация анализируемых показателей качества зерна озимой ржи. Для селекционной оценки озимой ржи предлагается использовать четыре интегральных показателя, имеющих наибольшую весовую нагрузку: содержание белка, число падения, вязкость водного экстракта и масса 1000 зерен. Этот комплекс признаков будет обеспечивать объективность и полноту оценки создаваемого селекционного материала. Показано, что кинематическая вязкость водного экстракта должна стать важным селекционным показателем как для определения хлебопекарных качеств ржи, так и для выявления кормовых достоинств зерна. Ключевые слова: озимая рожь; качество зерна; число падения; вязкость водного экстракта; белок; амилограмма; метод главных компонент.

**Для цитирования:** Пономарева М.А., Пономарев С.Н. Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019;23(3):320-327. DOI 10.18699/VJ19.496

## Optimization of grain quality parameters for winter rye breeding

M.L. Ponomareva<sup>1, 2</sup>✉, S.N. Ponomarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tatar Scientific Research Institute of Agriculture – Subdivision of the “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

✉ e-mail: smponomarev@yandex.ru

The purpose of this work was to evaluate the phenotypic variability of grain quality indicators and to identify the set of the most informative indicators for the selection of different use varieties of winter rye. The research was carried out in Tatar Scientific Research Institute of Agriculture – Subdivision of the “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences” in 2001–2015 on 15 varieties of winter rye. Twenty parameters defining quality of grain and raw value were estimated: technological indicators (thousand grain mass, full-scale weight and grain uniformity), parameters preharvest sprouting (falling number, rate of amylogram, temperature of peak of starch gelatinization), kinematic water extract viscosity (WEV) of grain meal, baking properties (organoleptic assessment of trial baking bread). The greatest influence of genotype was found on WEV (34.8 %) and protein content (27.8 %). These features should be primarily the subject of phenotypic evaluation in the breeding process. Phenotypic variability of criteria of carbohydrate-amylase complex, α-amylases activity and technological parameters was determined predominantly (68.6 ... 82.5 %) by environmental factors. There was no significant relationship between falling number and protein content. The falling number correlated with the rate of amylogram and the temperature of gelatinization. Positive conjugation of the average power of WEV with the rate of amylogram and falling number was found. On the basis of a prolonged phenotypic evaluation using principal component analysis we have optimized the analyzed indicators of quality properties of winter rye grain. For breeding evaluation of winter rye it is proposed to use four integral indi-

cators having the greatest weight load: protein content, falling number, water extract viscosity and thousand grain mass. This complex of features will provide objectivity and completeness of the evaluation of the breeding material. It was shown that the kinematic viscosity of the water extract should become an important selection index, both for determining the baking qualities of rye, and for revealing the fodder grain advantages.

Key words: winter rye; grain quality; falling number; water extract viscosity; protein; amylogram; principal component analysis.

**For citation:** Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Optimization of grain quality parameters for winter rye breeding. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):320-327. DOI 10.18699/VJ19.496 (in Russian)

## Введение

Мировое производство ржи в 2016 г. составило 13 млн тонн с площади посева 5.4 млн га. Основными районами возделывания этой культуры остаются умеренно холодные и малоплодородные зоны Центральной и Восточной Европы. Р. Шлегель утверждает, что рожь является преимущественно культурой европейского континента, поскольку на его долю приходится 85 % производимого зерна (Schlegel, 2013).

Россия – одно из крупнейших государств мира, занимающее второе место по производству зерна ржи после Германии. В нашей стране рожь занимает пятое место по объему производства зерна (2.0 %). За последние четыре десятилетия посевные площади озимой ржи в Российской Федерации сократились в шесть раз (с 7.75 млн га в 1970 г. до 1.25 млн га в 2016 г.). Негативный процесс привел к тому, что стал наблюдаться спад товарного предложения зерна ржи на рынке в связи со снижением объемов его производства как в Российской Федерации в целом, так и в отдельных регионах страны. Регрессионный анализ показал, что средняя ежегодная потеря валового сбора зерна этой культуры составляла 342 тыс. тонн. Главной причиной подобной ситуации был низкий спрос на зерно со стороны потребителей в связи с узкой сферой использования ржи (Пономарева и др., 2014).

Современное состояние производства ржи характеризуется сложностью и противоречивостью. Несмотря на нежелательные тенденции, происходящие в ржесейнии, Россия продолжает занимать лидирующие позиции как по площади посева, так и по валовому сбору зерна.

В связи с этим важной задачей селекции озимой ржи является комплексное изучение качественных свойств зерна для создания сортов хлебопекарного направления, производства кормов для животных, спирта и сырья для глубокой переработки (Гончаренко, 2014).

По мнению А.И. Алтухова (2012), рыночный спрос формируется не на продовольственное зерно в целом, а на партии разного качества и целевого использования. Согласно критериям ЕС, ржаное зерно обладает хлебопекарными качествами, если число падения более 120 с, максимальная вязкость, оцениваемая по высоте амилограммы больше 200 е. а. и максимальная температура пика клейстеризации больше 63 °С (Muenzing et al., 2014). Доля ржи, соответствующая указанным выше нормативам, варьировала от 25 до 100 % в течение 1992–2014 гг., составила в среднем 80 %. Это обусловлено тем, что качество ржи очень отличается по годам (Buehmer, 2005; Kusegova, 2009).

В отличие от пшеницы, где ключевую роль в определении качества играют концентрация белка, количество

и свойства клейковины, для ржи наиболее важные характеристики – содержание пентозанов и крахмала, а также активность фермента альфа-амилазы.

За последние 20 лет все больше исследователей стали уделять особое внимание наряду с традиционным изучением процесса деградации крахмала под действием эндогенных ферментов зерна количественной оценке содержания пентозанов (высокомолекулярных арабиноксиланов), их состоянию (водопоглощение, вязкость и растворимость), а также их деятельности и последующих модификациях (Bengtsson et al., 1992; Nowotna et al., 2007).

Качество ржаной муки, используемой для хлебопечения, зависит от трех главных факторов: 1) количества и функциональных свойств арабиноксиланов; 2) особенностей крахмала; 3) присутствия и концентрации ферментов, используемых для гидролиза.

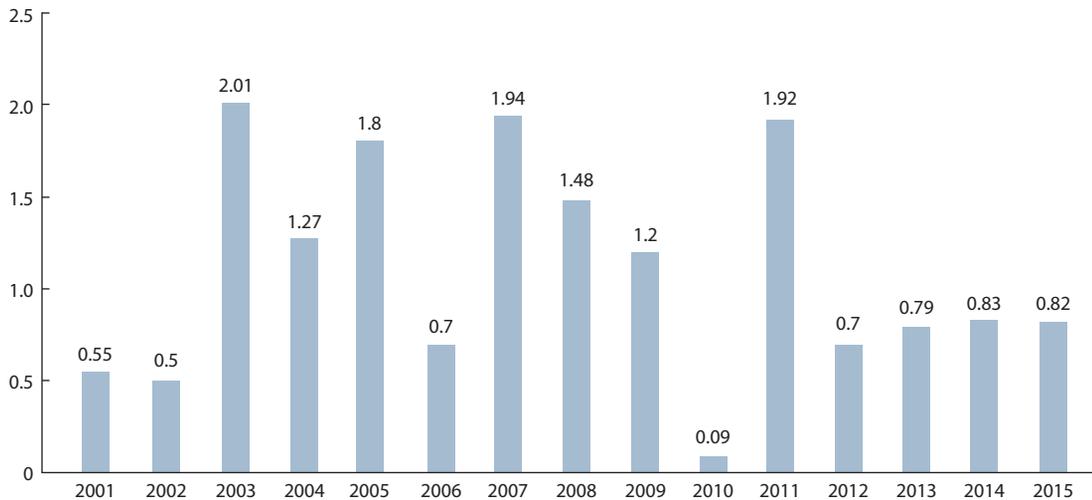
Многочисленными исследованиями подтверждено, что положительный эффект от общего содержания пентозанов и их водорастворимой фракции выражается в улучшении реологических показателей ржаного теста в процессе выпечки хлеба (D'Appolonia, 1973; Delcour, 1995; Weipert, 1995).

Несмотря на то, что биохимические исследования зерна ржи довольно широко ведутся в нашей стране и за рубежом, многие вопросы селекционной направленности разработаны слабо. При этом возникает необходимость развития комплексных исследований селекционного плана, в частности методических подходов к созданию сортов с высоким качеством зерна целевого назначения.

Цель настоящей работы – оценить фенотипическую изменчивость показателей качества зерна и выявить комплекс наиболее информативных показателей для селекции разнообразных по направлению использования сортов озимой ржи.

## Материалы и методы

Работа выполнена в Татарском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – обособленном структурном подразделении Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН) в 2001–2015 гг. Опытные поля находятся в Лаишевском районе (55°38'60" с. ш., 49°18'25" в. д.) Республики Татарстан, находящейся на стыке Центральной России и Поволжья по среднему течению р. Волги и нижнему течению р. Камы. Агробиохимические показатели селекционного севооборота являются типичными для среднесуглинистой серой лесной почвы. Сумма активных температур в зоне исследования колеблется в пределах 1700–2000°. Период активной вегетации растений равен 130–



Hydrothermal coefficient during the development and ripening of winter rye grain (June-July), 2001–2015.

135 дням. Среднегодовое количество осадков за год составляет 430–500 мм, за период май–сентябрь – 290–300 мм, но оно крайне неравномерно. Средняя высота снежного покрова за зиму составляет 35–45 см. Глубина промерзания почвы колеблется от 38 до 180 см.

Гидротермический коэффициент, характеризующий степень увлажнения территории в период с момента образования зерновки до полной спелости за 2001–2015 гг., показан на рисунке.

Из приведенных данных видно, что в наиболее ответственный период формирования качественных характеристик зерна складывались разнообразные условия: крайне засушливые (2002, 2010), сильно засушливые (2001, 2006, 2012), умеренно засушливые (2013, 2014, 2015), слабо засушливые (2009), влажные (2004, 2008) и избыточно влажные (2003, 2005, 2008, 2011) годы.

Для анализа было использовано 15 сортов озимой ржи конкурсного сортоиспытания, среди которых 9 – собственной селекции (Татарская 1, Эстафета Татарстана, Радонь, Огонек, Тантана, Спутник, перспективные популяции 8, 9, 10) и сорта других селекционных учреждений России (Антарес, Безенчукская 87, Саратовская 7, Марусенька, Татьяна, Роксана). Полевые эксперименты проведены на делянках 20 м<sup>2</sup>, в четырех повторениях.

Всего оценивалось 20 параметров, определяющих качество зерна и сырьевую ценность. Технологические (масса 1000 зерен (МТЗ), натурная масса зерна (НЗ) и выравненность зерна (ВЗ)) и хлебопекарные свойства (органолептическая оценка пробной выпечки хлебцев) изучены по соответствующим методикам, принятым для государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (Методика..., 1988). У всех сортов исследовались параметры устойчивости к прорастанию зерна (число падения (ЧП), высота амилограммы (ВА), температура пика клейстеризации крахмала (ТПК)).

Размол зерна осуществляли на лабораторной мельнице Perten Instruments Laboratory Mill 3100. Для помола использована средняя проба зерна массой 300 г. Число падения определяли на приборе Falling Number 1500 (Hagberg-Perten) в соответствии с требованиями между-

народного стандарта ISO 3093 (2009), максимальную вязкость суспензии и температуру клейстеризации – на амилографе Brabender (ГОСТ ISO 7973-2013). Определение массовой доли белка (Б) проводили по методу Кьельдала (ICC 167).

Вязкость водного экстракта (ВВЭ) ржаного шрота (кинематическая вязкость) оценивалась вискозиметрическим методом на приборе ВПЖ 1, согласно методике, опубликованной нами ранее (Пonomareva и др., 2017), соотношение шрота и воды было 1:5.

Корреляционный и дисперсионный анализы проведены с использованием пакета Excel 7.0. Критическое значение коэффициента корреляции при 5 % уровне значимости равно 0.444. В качестве математической модели для многомерного анализа применяли метод главных компонент (пакет программ AGROS 2.13), который позволил выделить коррелирующие и взаимозависимые показатели качества зерна и выбрать из них самые информативные, а также снизить их размерность. Для построения биplot графика использована программа XLSTAT 2018.6.54644.

## Результаты

Показатели качества зерна обусловлены большой группой сцепленных генов, экспрессия которых подвержена значительному влиянию генетических и средовых факторов, а также их взаимодействию. Согласно полученным данным, доля дисперсии, характеризующая влияние условий года на изменчивость обсуждаемых признаков, очень высока и ранжируется в порядке убывания следующим образом: высота амилограммы – 82.5 %, температура пика клейстеризации – 80.3 %, число падения – 73.7 %, выравненность зерна – 77.7 %, масса 1000 зерен – 77.2 %, натурная масса зерна – 68.6 %, вязкость водного экстракта – 49.0 %, содержание белка – 35.2 % (табл. 1).

Наибольшее влияние выявлено по ВВЭ и Б – соответственно 34.8 и 27.8 %. Суммарный эффект генотипа и генотип-средовых взаимодействий объяснял 64.8 % общего варьирования содержания белка и 51 % фенотипической изменчивости ВВЭ зернового шрота сортов озимой ржи. Это означает, что среди исследуемых в течение 15 лет

**Table 1.** Contributions of the genotype, environment and genotype × environment interaction to the variation of quality indices in winter rye grain, 2001-2015

| Traits                        | Factor share, % |      |                           |
|-------------------------------|-----------------|------|---------------------------|
|                               | Genotype        | Year | Genotype–year interaction |
| 1000-grain weight             | 20.2            | 77.2 | 2.6                       |
| Hectoliter weight             | 21.8            | 68.6 | 9.6                       |
| Grain uniformity              | 15.5            | 77.7 | 6.8                       |
| Protein content               | 27.8            | 35.2 | 37.0                      |
| Amylograph peak viscosity     | 12.0            | 82.5 | 5.5                       |
| Temperature at peak viscosity | 6.9             | 80.3 | 12.8                      |
| Falling number                | 11.2            | 73.7 | 15.1                      |
| Viscosity water extract       | 34.8            | 49.0 | 16.2                      |

**Table 2.** Correlation coefficients of grain quality indices in winter rye

| Index | TGW   | HW    | GU    | P      | APV    | TPV    | FN     | VWE    | H/D*   | BV**   |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TGW   | 1.000 | 0.757 | 0.929 | -0.480 | -0.107 | -0.079 | -0.315 | -0.522 | -0.118 | -0.210 |
| HW    |       | 1.000 | 0.753 | -0.575 | 0.294  | 0.416  | 0.133  | -0.141 | 0.346  | -0.336 |
| GU    |       |       | 1.000 | -0.504 | -0.267 | -0.151 | -0.404 | -0.624 | -0.261 | -0.116 |
| P     |       |       |       | 1.000  | -0.189 | -0.208 | 0.072  | -0.200 | -0.098 | 0.242  |
| APV   |       |       |       |        | 1.000  | 0.835  | 0.774  | 0.621  | 0.856  | -0.563 |
| TPV   |       |       |       |        |        | 1.000  | 0.821  | 0.386  | 0.750  | -0.397 |
| FN    |       |       |       |        |        |        | 1.000  | 0.471  | 0.774  | -0.162 |
| VWE   |       |       |       |        |        |        |        | 1.000  | -0.211 | 0.450  |
| H/D*  |       |       |       |        |        |        |        |        | 1.000  | -0.449 |
| BV**  |       |       |       |        |        |        |        |        |        | 1.000  |

\* H/D, ratio of bread height to diameter; \*\* BV, bread volume.

генотипов имеется значительное сортовое разнообразие как по средней величине названных признаков, так и по конкретным значениям в отдельные годы испытаний.

Для селекционных целей важно знать не только генотипическую и средовую изменчивость, но и взаимосвязь между качественными показателями зерна ржи, выраженную коэффициентами парной корреляции (табл. 2).

Как и следовало ожидать, сопряженная изменчивость признаков МТЗ, НЗ и ВЗ имеет сильную корреляционную зависимость между собой ( $r = 0.753-0.929$ ). Между ЧП и содержанием белка отсутствовала значимая связь ( $r = 0.072$ ). ЧП коррелировало с ВА ( $r = 0.774$ ) и ТПК ( $r = 0.821$ ). Эти три признака находились в тесной связи с показателем отношения высоты хлеба к его диаметру: коэффициент парной корреляции ЧП с показателем отношения высоты хлеба к его диаметру составил 0.774, у признака «высота амилограммы» –  $r = 0.856$ , у признака «температура пика клейстеризации» –  $r = 0.750$ .

По годам мы наблюдали значительную вариацию тесноты корреляционной связи между анализируемыми признаками, поскольку их величина в сильной степени зависит от условий среды. Кроме того, при определении числа падения и показаний амилографа имеются существенные

методические различия, связанные с продолжительностью анализа и температурой определения вязкости. ВВЭ была взаимосвязана умеренной отрицательной связью с МТЗ ( $r = -0.522$ ) и ВЗ ( $r = -0.624$ ).

В селекции сортов целевого использования очень большое значение имеют знания корреляционных отношений между числом падения (основной показатель качества, нормируемый ГОСТом РФ) и такими дополняющими параметрами, как вязкость водно-мучной суспензии, регистрируемая на амилографе, и вязкость водного экстракта зернового шрота, определяемая на вискозиметрах.

Выявлена положительная сопряженность средней силы ВВЭ с высотой амилограммы ( $r = 0.621$ ) и ЧП ( $r = 0.471$ ) (см. табл. 2). Однако достоверная связь между ЧП, ВА и ВВЭ зернового шрота прослеживалась только в отдельные годы, либо отсутствовала совсем.

Эффективность селекции озимой ржи на качественные характеристики зерна определяется тем, на каком этапе селекционного процесса и по каким признакам идет отбор в питомниках, поскольку начальным этапом формирования технологических свойств зерна озимой ржи является селекция. Пороговые значения тестируемых показателей и результаты селекции будут на многие годы предопреде-

**Table 3.** Factor loading values of quality indices in winter rye grain, 2001–2010

| Index                                  | Principal component |        |        |        |        |
|--|---------------------|--------|--------|--------|--------|
|  | 1                   | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 1000-grain weight, g                   | 0.171               | -0.459 | 0.331  | 0.287  | -0.753 |
| Hectoliter weight, g/l                 | -0.498              | -0.376 | 0.617  | -0.035 | -0.478 |
| Grain uniformity, %                    | -0.010              | 0.120  | 0.847  | -0.341 | -0.389 |
| Protein content, %                     | 0.644               | 0.442  | -0.372 | 0.383  | 0.324  |
| Amylograph peak viscosity, e.a.        | -0.421              | -0.129 | 0.890  | -0.095 | -0.073 |
| Temperature at peak viscosity, °C      | -0.723              | 0.197  | 0.637  | -0.097 | -0.151 |
| Falling number, s                      | -0.871              | 0.101  | 0.468  | -0.108 | 0.032  |
| Viscosity water extract, cSt           | 0.176               | -0.669 | 0.679  | 0.196  | -0.147 |
| Bread surface, score                   | 0.122               | -0.096 | -0.918 | -0.362 | -0.050 |
| Bread symmetry, score                  | -0.780              | -0.608 | -0.018 | -0.012 | -0.145 |
| Bread appearance, score                | 0.160               | -0.939 | -0.008 | 0.306  | 0.001  |
| Bread crust color, score               | -0.321              | -0.850 | -0.399 | -0.039 | -0.120 |
| Crumb color, score                     | 0.436               | -0.794 | -0.303 | 0.241  | -0.170 |
| Bread porosity, score                  | -0.214              | -0.452 | -0.856 | -0.027 | -0.124 |
| Elasticity, score                      | 0.616               | 0.025  | -0.646 | -0.120 | -0.434 |
| Bread taste, score                     | -0.018              | 0.106  | 0.049  | -0.992 | -0.039 |
| Ratio of bread height to diameter, H/D | -0.212              | -0.454 | 0.767  | -0.289 | -0.277 |
| Bread volume, mm                       | -0.082              | 0.958  | -0.097 | -0.054 | 0.252  |
| Bread volume, score                    | 0.309               | 0.922  | -0.170 | 0.087  | -0.135 |
| General baking score                   | 0.200               | -0.545 | -0.407 | 0.673  | -0.208 |
| Variance                               | 3.738               | 6.175  | 6.263  | 2.246  | 1.577  |
| Variance, %                            | 18.7                | 30.9   | 31.3   | 11.2   | 7.9    |
| Cumulative variance, %                 | 18.7                | 49.6   | 80.9   | 92.1   | 100.0  |

лять качество зерна в соответствии с направлением его использования.

В селекционной работе мы анализировали восемь технологических параметров (включая ВВЭ) и двенадцать хлебопекарных показателей, получаемых при пробной выпечке хлебцев. Последние характеристики отличаются трудоемкостью, требуют значительного количества зерна и имеют некоторую оценочную субъективность, вследствие чего число анализируемых сортообразцов обычно ограничено. Если хотя бы часть перекрывающихся (избыточных) признаков будет отсеяна, это, несомненно, приведет к оптимизации селекционного процесса на качество зерна. В условиях возрастающего объема селекционного материала и скудности материальных ресурсов выражение множества показателей качества через меньшее их число чрезвычайно важно. Фенотипическая оценка изучаемых показателей качества за годы исследований (средние значения для 15 сортов озимой ржи) приведена в Приложении 1<sup>1</sup>.

На основе анализа вычисленной корреляционной матрицы получены вклады, с которыми признаки включены в главные компоненты, т. е. новые характеристики каче-

ства. Главные компоненты отражают несколько причин изменчивости качественных характеристик, а их значимость оценивается по доле дисперсии в общей дисперсии признака.

Значения факторных нагрузок на пять главных компонент показаны в табл. 3. Исходя из представленных данных, первая компонента описывала 18.7 % общей дисперсии. Мы назвали ее «белково-амилазной характеристикой зерна». Две следующие главные компоненты переменных имели примерно равные дисперсии: 30.9 и 31.3 %. Для визуализации группы тесно коррелирующих признаков метод главных компонент дополнен биplot анализом взаимосвязей признаков качества в системе двух основных компонент с наибольшей долей в дисперсии (Приложение 2). Для оптимизации оценки качественных характеристик желательнее выбрать показатели из разных четвертей графика.

Вторая компонента охватывала признаки, обуславливающие «органолептические свойства хлеба»: внешний вид, симметричность, цвет корки и мякиша, объемные характеристики.

Третья компонента интегрировала в себе мукомольные качества (натурная масса, выравненность) и формоустойчивость хлеба, основанная на вязких свойствах водного

<sup>1</sup> Приложения 1 и 2 см. по адресу:  
<http://www.bionet.nsc.ru/vogis/download/pict-2019-23/appx6.pdf>

экстракта и клейстеризованной суспензии (высота амилограммы и температура максимальной вязкости). Это доказывает, что перечисленные признаки изменяются согласованно. Независимо от генотипа, сорта сходным образом реагируют на изменение внешних факторов, но знаки их факторных нагрузок не одинаковы. Структура первых трех главных компонент оставалась неизменной при варимакс-вращении, что свидетельствует об их взаимной нескоррелированности.

Остальные главные компоненты ранжировались по мере уменьшения описываемых ими дисперсий. На четвертую компоненту приходилось 11.2 % общей дисперсии, где преобладали вкус и общая хлебопекарная оценка. Последнюю компоненту определяла масса 1000 зерен.

Необходимо отметить важность признака «вязкость водного экстракта», который присутствовал в двух компонентах, имеющих значительную долю изменчивости. Отсюда следует, что в селекционных исследованиях показатель ВВЭ может стать базовым, так как является обобщающей характеристикой хлебопекарных свойств зерна, в которой учтены многие слагающие их параметры.

Следующий шаг исследований – выявление наиболее информативных показателей, которые можно применять на самых ранних этапах селекции. По нашему убеждению, ими должны стать: белок, число падения, вязкость водного экстракта, масса 1000 зерен. Эти показатели приняты за основу при оценке и браковке селекционного материала по качеству зерна. Показатели, выявляемые в ходе традиционного хлебопекарного анализа, вполне заменимы легко определяемой вязкостью.

## Обсуждение

В результате проведенных исследований сортов озимой ржи различного эколого-географического происхождения на протяжении 15 различающихся лет испытания установлено, что наибольшую генотипическую изменчивость имеют признаки Б и ВВЭ. Варьирование содержания белка на 27.8 % от общей дисперсии признака в исследуемом комплексе определялось генотипом, на 37 % взаимодействием генотип–среда и на 35.2 % условиями года. По вязкости водного экстракта одноименные источники варьирования составили 34.8, 16.2 и 49 % соответственно. Следовательно, названные признаки (Б и ВВЭ) должны быть, в первую очередь, предметом фенотипической оценки в селекционном процессе. Фенотипическая изменчивость критериев углеводно-амилазного комплекса и активности  $\alpha$ -амилаз (ЧП, ВА, ТПК) и технологических параметров (МТЗ, ВЗ, НЗ) определялась преимущественно (68.6...82.5 %) средовыми факторами, что значительно превышает влияние генотипа (6.9...21.8 %). В исследовании был взят пятнадцатилетний временной отрезок, в который попали годы, значительно различающиеся по гидротермическому режиму в период созревания зерна (молочная и восковая спелость). Поэтому погодные условия сыграли первостепенную роль в вариабельности качества зерна, а различия между сортами на фоне влияния средовых факторов были относительно невелики.

При исследовании 19 различных гибридных и популяционных сортов, выращенных в течение трех лет, Н.В. Hansen с коллегами (2004) обнаружили, что вариация

концентрации белка зависела в основном от генотипа, а масса 1000 зерен и содержание пентозанов в большей степени – от года испытания. Авторы выявили также, что свойства крахмала, измеряемые ЧП и ТПК, были сильнее подвержены влиянию условий года сбора урожая. В.М. Бебякин (2008) предлагает пересмотреть подходы к тестированию селекционного материала, поскольку роль углеводно-амилазного комплекса в определении хлебопекарных качеств ржи преувеличена. Согласно проведенным нами исследованиям, высокая средовая вариация показателей ЧП, ВА и ТПК затрудняет выявление перспективных форм.

Встает резонный вопрос, на какие признаки следует ориентироваться в селекции на целевое использование – хлебопечение или кормовые цели? Обобщение ряда публикаций показывает, что имеются умеренно сильные положительные взаимосвязи между ЧП и ТПК и между ЧП и вязкостью. В то же время не выявляются или существуют слабые корреляции между концентрацией белка и числом падения, а также между максимальной амилографической вязкостью и температурой клейстеризации (Rattunde et al., 1994; Gomez et al., 2009; Laidig et al., 2017). А. Repeckiene с коллегами (2001) обнаружили, что высокие значения ЧП соответствовали высоким значениям вязкости клейстеризованной суспензии ( $r = 0.87$ ). В исследованиях А.А. Гончаренко с коллегами (2002), напротив, показано, что, несмотря на положительную корреляцию ЧП с ВА ( $r = 0.56$ ), содержанием водорастворимых пентозанов ( $r = 0.46$ ) и качеством мякиша формового хлеба ( $r = 0.53$ ), оценивать качество ржаного хлеба только по ЧП можно лишь косвенно. Это обусловлено тем, что хлебопекарные качества зерна ржи и качество конечного продукта (ржаной хлеб) определяются большой группой свойств: вязкость по амилографу и уровень активности амилолитических ферментов отражают особенности ретроградации крахмала, а содержание водорастворимых пентозанов, регистрируемое по ВВЭ, – водопоглощительную способность различных компонентов набухания ржаной муки. При выпечке ржаного теста пористая и эластичная структура мякиша поддерживается благодаря высокой вязкости слизистых веществ, закрепляемых клейстеризованным крахмалом. Изменение крахмала при клейстеризации имеет решающее значение для образования пористого мякиша хлеба. Структура теста, создаваемая главным образом пентозанами, формируется при температуре 30 °С, тогда как роль крахмала преобладает при температурах выше 45 °С, поскольку крахмал ржи образует желеобразную структуру при более низкой температуре, чем крахмал пшеницы (Gudmundsson, Eliasson, 1991). Поэтому особый интерес представляет создание методами селекции сортов ржи с контрастной ВВЭ. Разнонаправленный отбор позволяет изменить биохимическую структуру некрахмальных полисахаридов в соответствии с задачами селекции: 1) увеличить содержание трудногидролизующих арабинооксианов, улучшив хлебопекарные свойства, или 2) снизить их долевое участие, улучшив кормовую ценность зерна (Гончаренко, 2014).

ВВЭ не связана с крахмалом ржи, клейстеризационные свойства которого проявляются под влиянием температурного фактора, а также с активностью амилолитических

ферментов, гидролизующих его, поэтому не прослеживается достоверная взаимосвязь между ВВЭ и показателями, определяющими вязкость водно-мучной суспензии ( $r = 0.03...-0.29$ ) (Гончаренко и др., 2005).

В наших исследованиях выявлена положительная сопряженность средней силы вязкости водного экстракта с высотой амилограммы ( $r = 0.621$ ) и числом падения ( $r = 0.471$ ).

Объяснением неординарных результатов, полученных разными авторами в отношении ВВЭ, служат несколько причин. Во-первых, взаимосвязи между параметрами технологической и хлебопекарной оценки зерна, муки и факторами среды произрастания неоднозначны. Это связано с тем, что каждый признак формируется под действием множества внешних факторов и сам по себе является интегральной характеристикой группы свойств и признаков, изменение которых может иметь как однонаправленные, так и противоположные векторы, причем значимость их далеко не одинакова. Во-вторых, разные авторы при анализе ВВЭ используют неординарные методики и аппаратуру для ее определения, что также отражается на получаемых результатах.

## Заключение

С помощью метода главных компонент проведена редукция анализируемых показателей качества зерна. Поиск структуры в матрице нагрузок и использование варимакс-вращения в пространстве главных компонент позволили дать их интерпретацию: белково-амилазная характеристика, органолептические свойства хлеба, мукомольные качества и формоустойчивость, вкус и общая хлебопекарная оценка, масса 1000 зерен. Для селекционной оценки озимой ржи предлагается использовать четыре интегральных показателя, имеющих наибольшую весовую нагрузку: содержание белка, число падения, вязкость водного экстракта и масса 1000 зерен.

Результаты наших исследований показали необходимость обязательной оценки селекционного материала по содержанию белка и вязкости водного экстракта. Чем раньше начинается селекция на эти качественные характеристики, а не только на урожайность, тем результативнее будет работа по созданию высококачественных сортов. Кинематическая вязкость вытяжек из ржаного шрота должна стать важным селекционным показателем как для определения хлебопекарных качеств ржи, так и для выявления кормовых достоинств зерна.

Среди множества направлений в работах по селекции ржи на первый план выдвигается следующее требование – соответствие качества зерна требованиям рынка. Каждому сорту должны быть присущи свои генетически детерминированные технологические свойства, позволяющие выявить его пригодность как сырья для конкретной отрасли. Только селекционная работа позволяет направленно создавать сорта для целевого использования и расширения технологий, связанных с переработкой ржи. Именно в этом нам видится реновация ржи – переоткрытие ржи с новых позиций, что должно привести к изменениям в отношении к культуре в целом и ее производству.

На основании многолетней фенотипической оценки проведена оптимизация показателей качества зерна озимой ржи и обоснован полноценный комплекс признаков (белок, число падения, вязкость водного экстракта, масса 1000 зерен), который будет обеспечивать объективность и полноту оценки создаваемого селекционного материала.

мой ржи и обоснован полноценный комплекс признаков (белок, число падения, вязкость водного экстракта, масса 1000 зерен), который будет обеспечивать объективность и полноту оценки создаваемого селекционного материала.

## Список литературы / References

- Алтухов А.И. Развитие рынка продовольственного зерна в России. Нива Поволжья. 2012;4(25):2-12.  
[Altukhov A.I. The development of the food grain market in Russia. Niva Povolzhya = Volga Region Farmland. 2012;4(25):2-12. (in Russian)]
- Белякин В.М. Методические подходы к оценке качества зерна озимой ржи в процессе селекции. Озимая рожь: селекция, семеноводство, технологии и переработка. Саратов, 2008;90-94.  
[Bebyakin V.M. Methodology of the evaluation of winter rye grain quality during breeding. Winter Rye: Breeding, Production, Technology and Processing. Saratov, 2008;90-94. (in Russian)]
- Гончаренко А.А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. М., 2014.  
[Goncharenko A.A. Topical Issues of Winter Rye Breeding. Moscow, 2014. (in Russian)]
- Гончаренко А.А., Беркутова Н.С., Тимошенко А.С. Сравнительная оценка сортов озимой ржи по различным показателям качества зерна. Докл. РАСХН. 2002;5:3-7.  
[Goncharenko A.A., Berkutova N.S., Timoshenko A.S. Comparative evaluation of winter rye cultivars with regard to various grain quality indicators. Doklady Rossiyskoy Akademii Selskokhozyaystvennykh Nauk = Proceedings of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2002;5:3-7. (in Russian)]
- Гончаренко А.А., Исмагилов Р.Р., Беркутова Н.С., Ванюшина Т.Н., Аюпов Д.С. Оценка хлебопекарных качеств зерна озимой ржи по вязкости водного экстракта. Докл. РАСХН. 2005;1:6-9.  
[Goncharenko A.A., Ismagilov R.R., Berkutova N.S., Vanyushina T.N., Ayupov D.S. Evaluation of the bread-making quality of rye grain by viscosity of water extract. Doklady Rossiyskoy Akademii Selskokhozyaystvennykh Nauk = Proceedings of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2005;1:6-9. (in Russian)]
- Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур). М., 1988.  
[Methods of the State Testing of Agricultural Crop Varieties: Technological Evaluation of Grain, Cereal, and Leguminous Crops. Moscow, 1988. (in Russian)]
- Пономарева М.Л., Пономарев С.Н., Тагиров М.Ш. Динамика факторов производства и использования зерна ржи в Российской Федерации и Республике Татарстан. Земледелие. 2014;8:6-9.  
[Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Tagirov M.Sh. Dynamics of indices of rye grain production and use in the Russian Federation and the Republic of Tatarstan. Zemledelie = Agriculture. 2014;8:6-9. (in Russian)]
- Пономарева М.Л., Пономарев С.Н., Тагиров М.Ш., Гильмуллина Л.Ф., Маннапова Г.С. Генотипическая изменчивость содержания пентозанов в зерне озимой ржи. С.-х. биология. 2017;52(5):1041-1048.  
[Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Tagirov M.Sh., Gilmullina L.F., Mannapova G.S. Pentosan content genotypic variability in winter rye grain. Selskokhozyaystvennaya Biologiya = Agricultural Biology. 2017;52(5):1041-1048. DOI 10.15389/agrobiol.2017.5.1041rus. (in Russian)]
- Bengtsson S., Andersson R., Westerlund E., Aman P. Content, structure and viscosity of soluble arabinoxylans in rye grain from several countries. J. Sci. Food Agric. 1992;58:331. DOI 10.1002/jsfa.2740580307.
- Bruemmer J.M. Rye and its baking behavior. Cereal Technol. 2005;59:95-106.

- D'Appolonia B.L. Comparison of pentosans extracted from conventional and continuous bread. *Cereal Chem.* 1973;50:27.
- Delcour J.A. Structure of water- and alkali-extractable rye (*Secale cereale* L.) arabinoxylans. International Rye Symposium: Technology and Products. Espoo: VTT Biotechnology and Food Reserch. 1995; 161:103-111.
- Gomez M., Pardo J., Oliete B., Caballero P.A. Effect of the milling process on quality characteristics of rye flour. *J. Sci. Food Agric.* 2009; 89:470-476. DOI 10.1002/jsfa.3475.
- Gudmundsson M., Eliasson A.C. Thermal and viscous properties of rye starch extracted from different varieties. *Cereal Chem.* 1991;68: 172-177.
- Hansen H.B., Moller B., Andersen S.B., Jorgensen J.R., Hansen A. Grain characteristics, chemical composition, and functional properties of rye (*Secale cereale* L.) as influenced by genotype and harvest year. *J. Agric. Food Chem.* 2004;52:2282-2291. DOI 10.1021/jf0307191.
- Kucerova J. Effects of location and year on technological quality and pentosan content in rye. *Czech J. Food Sci.* 2009;27:418-424.
- Laidig F., Piepho H.P., Rentel D., Drobek T., Meyer U., Huesken A. Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national on-farm progress in Germany over 26 years. *Theor. Appl. Genet.* 2017;130(5):981-998. DOI 10.1007/s00122-016-2810-3.
- Muenzing K., Huesken A., Unbehend G., Begemann J., Arent L., Wolf K., Lindhauer M.G. Die Qualität der deutschen Roggenernte 2014. *Mühle Mischfutter.* 2014;155:745-754.
- Nowotna A., Buksa K., Gambus H., Ziobro R., Krawontka J., Sabat R., Grysztka A. Retrogradation of rye starch pastes. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 2007;6(4):95-102.
- Rattunde H.F., Geiger H.H., Weipert D. Variation and covariation of milling-and baking-quality characteristics among winter rye single-cross hybrids. *Plant Breed.* 1994;113(4):287-293. DOI 10.1111/j.1439-0523.1994.tb00738.x.
- Repeckiene A., Eliasson A.-C., Juodeikiene G., Gunnarsson E. Predicting baking performance from rheological and adhesive properties of rye meal suspensions during eating. *Cereal Chem.* 2001;78:193-199. DOI 10.1094/CCHEM.2001.78.2.193.
- Schlegel Rolf H.J. Rye: Genetics, Breeding and Cultivation. London: CRC Press Taylor and Francis Group, 2013.
- Weipert D. Processing performance of rye as influenced by sprouting resistance and pentosans contents. International Rye Symposium: Technology and Products. Espoo: VTT Biotechnology and Food Research. 1995;161:39-49.

---

#### ORCID ID

M.L. Ponomareva [orcid.org/0000-0002-1648-3938](https://orcid.org/0000-0002-1648-3938)  
S.N. Ponomarev [orcid.org/0000-0001-8898-4435](https://orcid.org/0000-0001-8898-4435)

**Acknowledgements.** This work was supported by the Kazan Research Center, Russian Academy of Sciences, project AAAA-A18-118031390148-1 and the Russian Foundation for Basic Research, project 17-29-08023ofi\_m.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Received August 19, 2018. Revised January 6, 2019. Accepted January 11, 2019.