

Генетические и физиологические основы селекции

УДК 633.14:631.524.6

doi: 10.15389/agrobiology.2017.5.1041rus

ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ПЕНТОЗАНОВ В ЗЕРНЕ ОЗИМОЙ РЖИ**М.Л. ПОНОМАРЕВА, С.Н. ПОНОМАРЕВ, М.Ш. ТАГИРОВ,
Л.Ф. ГИЛЬМУЛЛИНА, Г.С. МАННАПОВА**

Создание сортов разного направления использования — приоритетная задача селекции озимой ржи (*Secale cereale* L.). Дифференцирующим показателем, определяющим направление диверсификации ржаного зерна, служит его качественный состав и содержание пентозанов. Целью представленной работы стала оценка изменчивости общего количества пентозанов и содержания водорастворимой фракции арабиноксиланов у российских и зарубежных популяций, гибридов и линий озимой ржи. Объектом исследования служили популяционные и гибридные сорта, линейный и гибридный селекционный материал озимой ржи отечественной и зарубежной селекции. Содержание пентозанов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в системе HPLC-RI («JASCO Deutschland GmbH», Германия), химическим микрометодом с использованием ортин-хлорида и косвенно, посредством оценки вязкости водного экстракта (ВВЭ). Анализ фенотипической и генотипической вариации, расчет коэффициента вариации проводили на основе двухфакторного дисперсионного анализа с использованием множественного рангового критерия Дункана. В отечественном и зарубежном генофонде были идентифицированы образцы с низким и высоким содержанием пентозанов. Отечественные популяционные сорта и высокопентозановые линии селекции Татарского НИИ сельского хозяйства (ТатНИИСХ) выделялись высокими показателями общего содержания пентозанов и экстрагируемой вязкости. Зависимость между ВВЭ и содержанием фракции водорастворимых пентозанов в изученных количественных пределах с высокой вероятностью (95 %) имела прямолинейный характер. У низкопентозановых линий селекции ТатНИИСХ ВВЭ составляла 6,40-6,45 сантистокс (сСт), у российских популяционных сортов этот показатель находился в пределах 15,40-34,50, у гибридных сортов немецкой селекции достигал 47,50 сСт. У высокопентозановых образцов установлена высокозначимая положительная взаимосвязь между общим содержанием пентозанов, вязкостью водного экстракта и водорастворимой фракцией. Косвенная оценка пентозановой фракции посредством определения ВВЭ ржаного шрота позволяет начинать отбор на ранних этапах селекционного процесса и анализировать значительное число образцов за относительно короткое время. Необходим дальнейший поиск и селекция линий-доноров с низким содержанием арабиноксиланов и их водорастворимой фракции. Фенотипическая оценка малопентозановых форм, основанная только на определении косвенного показателя вязкости, затруднена. У малопентозановых линий выявлена значимая корреляция ВВЭ и содержания водорастворимой фракции ($r = 0,745$, $P = 0,05$). Наследуемость вязкости водного экстракта зернового шрота составила $H^2 = 0,71$, генотипический коэффициент вариации — 32,53 %, что свидетельствует о целесообразности совершенствования этого показателя селекционными методами. По содержанию водорастворимых пентозанов показатель наследуемости равнялся 0,50, а генотипический коэффициент вариации — 13,02 %, поэтому результативность отбора в этом случае будет невысокой. Представленные параметры генотипической изменчивости применимы только в отношении генотипов, использованных в рамках проведенного нами эксперимента. Выделены российские сорта Марусенька, Огонек, Чулпан 7 с наименьшим количеством водорастворимых пентозанов в муке и шроте. У сорта Огонек выявлено низкое содержание водорастворимой фракции в отрубях. Для более четкой дифференциации образцов, помимо количественной оценки содержания пентозанов (высокомолекулярных арабиноксиланов) в продуктах размола зерна, необходимо разработать экономичные методы анализа их состояния (водопоглощения, вязкости и растворимости).

Ключевые слова: озимая рожь, пентозаны, фракции, арабиноксиланы, вязкость водного экстракта, шрот, сорта, линии, наследуемость, генотипическая изменчивость.

Рожь имеет значительные преимущества по сравнению с пшеницей по содержанию полезных минеральных веществ, лизина и диетических волокон (клетчатки) (1, 2). Помимо крахмала, который составляет около 65 % сухого вещества, самый богатый компонент в цельнозерновой ржи — некрахмалистые (non-starch polysaccharides, NSP) полисахариды (17 %). Эти макромолекулы служат основным элементом клеточных стенок. Главные некрахмалистые полисахариды — арабиноксиланы (arabinoxylans, AX).

Они составляют около 8 % зерна и образуются из двух сахаров — L-арабинозы и D-ксилозы (3-5).

Важным показателем, определяющим диверсификацию применения ржаного зерна, служит содержание и качественный состав пентозанов, а также их состояние (водопоглощение, вязкость, растворимость в воде) (6-8). Формирование комплексов крахмал—арабиноксиланы обуславливает хорошие органолептические и хлебопекарные свойства ржаного хлеба, свежесть и диетические свойства продукта (9-12). В то же время пентозаны, а точнее высокомолекулярные арабиноксиланы, рассматриваются как главный фактор, ограничивающий использование ржи в кормлении животных, особенно моногастричных (13, 14).

Молекулярное строение и структурная организация арабиноксиланов определяют их физические свойства. Длинные молекулы растворимых пентозанов представляют собой сеть, которая обладает высокой абсорбирующей способностью и образует клейкие гелеобразные растворы. Антипитательные свойства пентозанов обусловлены способностью связывать воду, количество которой может в 10 раз превышать их собственную массу. У наиболее чувствительных групп сельскохозяйственных животных (птица и свиньи) при поедании корма из зерна ржи в пищеварительном тракте образуется высоковязкая суспензия, обволакивающая гранулы крахмала и протеинов, что ограничивает всасывание уже переваренного белка, крахмала, жира и других питательных веществ. В результате происходит расстройство пищеварения, ослабление и снижение продуктивности. Уменьшение количества пентозанов, в первую очередь водорастворимых, способствует улучшению фуражных свойств зерна ржи (15). По данным D. Vogos с соавт. (16), количество пентозанов варьирует в зависимости от генотипа (от 35 до 88 мг/г), что позволяет отбирать формы с высоким и низким содержанием водорастворимой фракции. В работе H.-U. Jürgens с соавт. (17) общее количество пентозанов изменялось от 89 до 103 мг/г, а экстрагируемая вязкость колебалась от 2,6 до 5,1 сантистокс (сСт).

Ряд исследователей предлагают использовать непрямой метод оценки количества пентозанов посредством определения вязкости водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота (18-20). Вязкость водно-шротовой суспензии может служить интегральным показателем качества селекционного материала, разграничивая линии ржи хлебопекарного и кормового направления (22). Величина наследуемости этого признака различается при дивергентном отборе и зависит от генотипа (15, 22, 23). При этом величина ВВЭ обусловлена как генотипическими (24, 25), так и средовыми факторами (26, 27). Наибольшая дифференцирующая способность проявляется в годы, когда в период налива складываются оптимальные и средnezасушливые погодные условия, которые наиболее благоприятны для селекции на этот признак (28). В связи с вышесказанным актуально выявление хозяйственной ценности каждого сорта озимой ржи как сырья для переработки.

В настоящем исследовании впервые с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии и определения экстрагируемой вязкости были выявлены контрастные по содержанию пентозанов генотипы озимой ржи, с участием которых впоследствии получены картирующие гибридные популяции для маркер-ориентированной и традиционной селекции.

Целью представленной работы стала оценка изменчивости общего количества пентозанов и содержания водорастворимой фракции арабиноксиланов у российских и зарубежных популяций, гибридов и линий озимой ржи.

Методика. Исследования зерновых проб озимой ржи (*Secale cereale* L.) проводили в 2010-2016 годах в Татарском НИИ сельского хозяйства (Тат-

НИИСХ). Изучались популяционные сорта российской и собственной селекции, образцы из коллекции Евросоюза, низкопентозановые и высокопентозановые линии, гибриды второго поколения, полученные в ТатНИИСХ при скрещивании контрастных линий, гибридные сорта селекции «KWS LOCHOW GmbH» (Германия). Всего проанализировали 110 образцов. Материал для исследований выращивали ежегодно в конкурсном сортоиспытании, коллекционном и гибридных питомниках на селекционной базе института. Через 2 нед после уборки урожая зерно размалывали на лабораторной мельнице Laboratory mill 3100 («Perten Instruments», Германия), отбор навесок муки и шрота проводили по ГОСТ 13586.5-85. Содержание пентозанов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в системе HPLC-RI («JASCO Deutschland GmbH», Германия) с использованием флуоресцентного детектора RF-10AXL и автосамплера 465 («Kontron Instruments», Германия) (17). Качественный состав пентозанов оценивали по общему количеству арабиноксиланов (total arabinoxylans, TAX) и фракции водорастворимых арабиноксиланов (soluble arabinoxylans, SAX).

Экстракцию образцов для определения содержания водорастворимых пентозанов (ВРП) и вязкости водного экстракта (ВВЭ) проводили согласно методике, описанной D. Voros с соавт. (16). Вязкость водного экстракта регистрировалась капиллярным вискозиметром ВПЖ-1 («Лабтех», Россия) с диаметром капилляра 1,52 мм (19). Соотношение шрота и воды — 1:5. Кинематическую вязкость водного экстракта рассчитывали в сантистоксах по формуле $V = g/9,807 \cdot T \cdot K$, где K — постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; V — кинематическая вязкость, $\text{мм}^2/\text{с}$; T — время истечения жидкости, с; g — ускорение свободного падения в месте измерения, $\text{м}/\text{с}^2$. Содержание водорастворимых пентозанов определяли микрометодом с использованием орцин-хлорида (29), модифицированным для зерна ржи (30).

Определение фенотипической и генотипической вариации, а также расчет коэффициента вариации проводили на основе двухфакторного дисперсионного анализа с использованием множественного рангового критерия Дункана (31). Для оценки генотипической изменчивости и вычисления коэффициента наследуемости применяли соответствующие формулы (31, 32):

$$\sigma_p^2 = \sigma_g^2 + \sigma_e^2, \quad \sigma_g^2 = \frac{M_g - M_e}{r},$$

$$PCV = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{x}} \times 100 \%, \quad GCV = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{x}} \times 100 \%, \quad H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_p^2},$$

где σ_p^2 и σ_g^2 — соответственно фенотипическая и генотипическая дисперсия; σ_e^2 — дисперсия остатка, M_g — средний квадрат для вариантов, M_e — средний квадрат для остатка, r — количество повторностей, PCV — фенотипический коэффициент вариации, %, GCV — генотипический коэффициент вариации, %, \bar{x} — среднее значение признака, H^2 — коэффициент наследуемости. Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ Excel 7.0. В таблицах представлены средние значения признака (X) и ошибки средних ($\pm S_x$).

Результаты. Среди изученных образцов было выявлено значительное количество хлебопекарных сортов с высоким содержанием SAX и ВРП, которые оказывают благоприятные воздействия на формирование ржаного теста, его формоустойчивость и качество хлеба в целом (табл. 1). Использование в рекомбинационной селекции европейских сортов и образцов из коллекции ВИР, а также гибридных сортов позволит создать материал для хлебопечения. Отечественные популяционные сорта и высокопентозановые линии селекции ТатНИИСХ выделялись высокими показателями общего содержания пентозанов (TAX) и экстрагируемой вязкости (ВВЭ).

Установлено, что ВВЭ зернового шрота имеет более широкий размах изменчивости, чем ВРП. Так, у нескольких низкопентозановых линий нашей селекции ВВЭ составляла 6,4-6,45 сСт. У гибридов F₂ было выявлено промежуточное наследование признака. Российские популяционные сорта имели ВВЭ в пределах 15,4-34,5 сСт, тогда как у гибридных сортов немецкой селекции он достигал 47,5 сСт.

1. Вязкость водного экстракта и содержание фракций пентозанов в зерне озимой ржи (*Secale cereale* L.) (Татарский НИИ сельского хозяйства, 2010-2016 годы)

| Происхождение образцов | Число образцов | SAX, % | TAX, % | ВВЭ, сСт | ВРП, % |
|--|----------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Популяционные сорта российской селекции | 7 | <u>3,82±0,21</u> 3,12-4,66 | <u>12,04±0,41</u> 10,53-13,72 | <u>23,6±2,2</u> 15,4-34,5 | <u>4,55±0,13</u> 4,03-4,97 |
| Образцы из коллекций Евросоюза | 7 | <u>5,02±0,07</u> 4,74-5,35 | <u>11,86±0,43</u> 10,86-13,8 | — | — |
| Низкопентозановые линии селекции Татарского НИИ сельского хозяйства | 10 | <u>3,76±0,13</u> 3,03-4,43 | <u>11,04±0,18</u> 10,19-11,74 | <u>9,5±1,2</u> 6,4-18,2 | <u>3,33±0,39</u> 1,90-4,41 |
| Высокопентозановые линии селекции Татарского НИИ сельского хозяйства | 5 | <u>3,96±0,16</u> 3,65-4,42 | <u>12,30±0,19</u> 11,68-12,82 | <u>28,1±2,5</u> 23,5-34,7 | <u>5,63±0,59</u> 4,59-7,14 |
| F ₂ гибриды селекции Татарского НИИ | 10 | <u>4,30±0,10</u> 3,70-4,90 | <u>11,11±0,15</u> 10,60-12,07 | <u>12,5±0,8</u> 9,9-18,5 | <u>1,78±0,04</u> 1,63-1,97 |
| Гибридные сорта немецкой селекции | 18 | <u>4,76±0,13</u> 3,93-5,48 | <u>11,65±0,21</u> 10,60-12,85 | <u>22,6±4,8</u> 8,0-47,5 | <u>1,84±0,10</u> 1,48-2,41 |

Примечание. SAX — водорастворимые арабиноксиланы, TAX — общие арабиноксиланы, ВВЭ — вязкость водного экстракта (сСт — сангистоксы), ВРП — водорастворимые пентозаны. Над чертой — среднее значение признака и ошибка среднего ($\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$), под чертой — минимальное и максимальное значения признака (min-max). Прочерки означают отсутствие данных.

2. Параметры генотипической изменчивости и наследуемости вязкости водного экстракта и содержания водорастворимых пентозанов в зерновом шроте озимой ржи (*Secale cereale* L.) (Татарский НИИ сельского хозяйства, 2010-2016 годы)

| Признак | GCV, % | PCV, % | σ_p^2 | σ_g^2 | H ² |
|---------------------------------------|--------|--------|--------------|--------------|----------------|
| Вязкость водного экстракта | 32,53 | 38,58 | 67,068 | 94,336 | 0,71 |
| Содержание водорастворимых пентозанов | 13,02 | 18,39 | 0,076 | 0,152 | 0,50 |

Примечание. PCV — фенотипический коэффициент вариации, GCV — генотипический коэффициент вариации, σ_p^2 — фенотипическая дисперсия, σ_g^2 — генотипическая дисперсия, H² — коэффициент наследуемости.

Анализ дисперсий показал значимые генотипические различия ($P \leq 0,05$) как по ВВЭ ($F_{\text{факт.}} = 15,76 > F_{\text{теор.}} = 2,18$), так и по содержанию ВРП ($F_{\text{факт.}} = 7,03 > F_{\text{теор.}} = 2,42$) у исследуемого материала (табл. 2). С помощью коэффициента наследуемости мы попытались выявить долю наблюдаемой вариации по изучаемым признакам, обусловленную генотипическими различиями, в общей фенотипической изменчивости. Для вязкости водного экстракта зернового шрота $H^2 = 0,71$, что указывает на целесообразность совершенствования этого признака селекционными методами (см. табл. 2). Показано также, что 50 % фенотипической изменчивости количества водорастворимых пентозанов обусловлено наследственными особенностями, то есть результативность отбора по этому показателю будет невысокой. Следует отметить, что наследуемость как мера относительного вклада генетических и средовых различий в фенотипическую изменчивость имеет ряд ограничений. В частности, наследуемость не служит атрибутом признака как такового, а зависит от состава генотипов только той популяции, на которой проведено исследование (33). В другой популяции с другим составом генотипов наследуемость того же самого признака может оказаться иной. Относительные значения GCV и PCV дают представления о величине изменчивости в изученном генном пуле (см. табл. 2). Генотипический коэффициент вариации для ВВЭ оказался высоким (32,53 %), что влияет на выбор метода отбора. Различия, наблюдаемые по генотипическому и фенотипическому коэффициенту вариации обоих показателей, были практически равными.

С использованием корреляционного анализа у группы российских популяционных сортов была установлена высокозначимая положительная взаимосвязь между ТАХ и ВВЭ ($r = 0,736$, $P = 0,05$), ТАХ и ВРП ($r = 0,639$, $P = 0,05$). У высокопентозановых линий, созданных в Татарском НИИ сельского хозяйства, для первой пары признаков $r = 0,790$ ($P = 0,01$), для второй — $r = 0,812$ ($P = 0,01$). Коэффициенты корреляции ВВЭ и ВРП приближались к единице, то есть о содержании водорастворимых пентозанов (арабиноксиланов) при отборе селекционного материала для хлебопекарных целей можно судить по величине ВВЭ зернового шрота.

Наиболее дефицитными источниками для селекции остаются малопентозановые формы. В процессе их 10-летнего отбора и изучения в ТатНИИСХ показано, что среднее значение SAX у таких образцов равнялось 3,76 % с колебаниями от 3,03 до 4,43 % (см. табл. 1), что было значительно ниже, чем у гибридов немецкой селекции и коллекционных форм. Различия по вязкости оказались еще более явными. Следует отметить, что пока мы не можем указать ограничительные параметры по исследуемым показателям для кормовых и хлебопекарных сортов. Наименьшее количество пентозанов содержалось в муке и шроте у сортов Марусенька, Огонек, Чулпан 7, а у сорта Огонек низкое количество растворимых арабиноксиланов выявили и в отрубях (рис. 1). У всех изученных сортов наибольшим было содержание пентозанов в отрубях. Это объясняется тем, что именно в оболочках зерновки ржи и алейроновом слое находится до 50 % пентозанов, в то время как в зародыше и крахмалистой части эндосперма, из которой получается мука, не более 15 %. Сорта Памяти Кунакбаева и Роксана имели более высокое содержание пентозанов во всех продуктах размола.

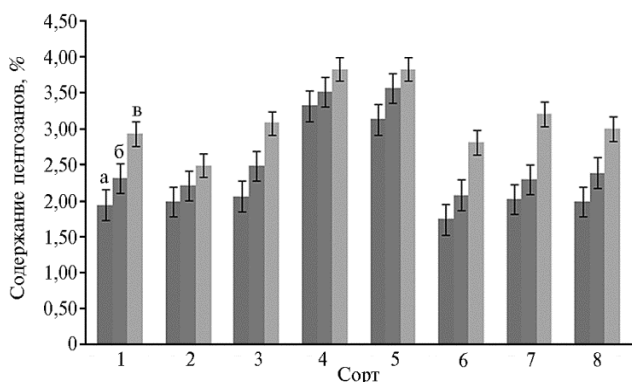


Рис. 1. Содержание пентозанов в муке (а), шроте (б) и отрубях (в) у популяционных сортов ржи (*Secale cereale* L.): 1 — Татарская 1, 2 — Огонек, 3 — Тантана, 4 — Память Кунакбаева, 5 — Роксана, 6 — Марусенька, 7 — Татьяна, 8 — Чулпан 7 (Татарский НИИ сельского хозяйства, 2013-2014 годы).

Широкий скрининг селекционного материала предполагает использование малозатратной, но объективной методики, позволяющей достаточно быстро дифференцировать создаваемые сорта по цели их дальнейшего использования. Косвенная оценка пентозановой фракции через определение вязкости водного экстракта ржаного шрота дает возможность начать отбор на ранних этапах селекционного процесса и анализировать значительное

число образцов за относительно короткое время.

Зависимость между ВВЭ и содержанием водорастворимых пентозанов в изученных количественных пределах с высокой вероятностью (95 %) имела прямолинейный характер и описывалась следующим уравнением регрессии $y = 0,0335x + 1,5401$, где y — содержание пентозанов в зерне, %, x — вязкость экстракта зернового шрота, сСт.

У малопентозановых линий выявлена значимая корреляция ВВЭ и ВРП ($r = 0,754$, $P = 0,05$). Регрессионный анализ показал наличие нелинейной зависимости между количеством общих арабиноксиланов и их водорастворимой фракции (рис. 2). Большой интерес представляют полученные нами гибриды F_2 между контрастными генотипами из российского

и зарубежного пулов. Они отличались сравнительно низкими значениями ВВЭ и ВРП. Следовательно, в селекционном плане выявлено небольшое

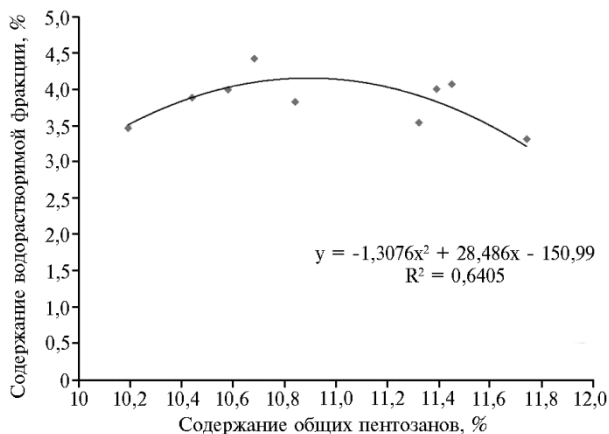


Рис. 2. Взаимосвязь содержания общих пентозанов и их водорастворимой фракции в зерновом шроте у низкопентозановых образцов озимой ржи (*Secale cereale* L.) (Татарский НИИ сельского хозяйства, 2013-2014 годы).

количество источников низкого содержания пентозанов, фенотипическая оценка которых только по косвенному показателю ВВЭ затруднена.

Таким образом, наши исследования показали, что мы располагаем достаточным генофондом для селекции хлебопекарной ржи. Выделены российские сорта Марусенька, Огонек, Чулпан 7 с наименьшим количеством водорастворимых пентозанов в муке и шроте. Установлена высокозначимая положительная взаимосвязь между общим содержанием пентозанов,

вязкостью водного экстракта и фракцией водорастворимых арабиноксиланов. Показано, что о содержании водорастворимых пентозанов (арабиноксиланов) можно судить по величине ВВЭ зернового шрота. Фенотипическая оценка малопентозановых форм, основанная только на определении косвенного показателя ВВЭ, затруднена. Наследуемость вязкости водного экстракта зернового шрота в наших опытах составила $H^2 = 0,71$, генотипический коэффициент вариации — 32,53 %. По содержанию водорастворимых пентозанов $H^2 = 0,50$, генотипический коэффициент вариации — 13,02 %, поэтому результативность отбора по этому показателю будет невысокой. Представленные параметры генотипической изменчивости применимы только в отношении генотипов, использованных в нашем эксперименте. Помимо количественной оценки содержания пентозанов (высокомолекулярных арабиноксиланов) продуктов размола зерна, необходимы экономичные методы анализа их состояния (водопоглощения, вязкости и растворимости), что позволит более четко дифференцировать образцы.

ФГБНУ Татарский НИИ сельского хозяйства,
420059 Россия, г. Казань, ул. Оренбургский тракт, 48,
e-mail: smponomarev@yandex.ru, tatniva@mail.ru, lilya-muslima@mail.ru,
mgs1980@mail.ru

Поступила в редакцию
6 февраля 2017 года

Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2017, V. 52, № 5, pp. 1041-1048

PENTOSAN CONTENT GENOTYPIC VARIABILITY IN WINTER RYE GRAIN

M.L. Ponomareva, S.N. Ponomarev, M.Sh. Tagirov, L.F. Gilmullina, G.S. Mannapova

Tatar Research Institute of Agriculture, Federal Agency of Scientific Organizations, 48, Orenburgskii tract, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, e-mail smponomarev@yandex.ru (corresponding author), tatniva@mail.ru, lilya-muslima@mail.ru, mgs1980@mail.ru

ORCID:

Ponomareva M.L. orcid.org/0000-0002-1648-3938

Ponomarev S.N. orcid.org/0000-0001-8898-4435

Tagirov M.Sh. orcid.org/0000-0002-7882-7783

The authors declare no conflict of interests

Received February 6, 2017

Gilmullina L.F. orcid.org/0000-0001-9358-5471

Mannapova G.S. orcid.org/0000-0002-9097-783X

doi: 10.15389/agrobiologia.2017.5.1041eng

Abstract

Varieties intended for diverse use are modern priority in winter rye (*Secale cereale* L.) breeding. Composition and content of pentosans are indicators to diversify rye grain use. The aim of this work was estimation of variability in total arabinoxylans and soluble arabinoxylans in rye grain. Pentosans content was determined by high performance liquid chromatography in the HPLC-RI system (JASCO Deutschland GmbH, Germany), by chemical micro method with use of orcinchloride, and indirectly by determining the viscosity of water extract (VWE). As a result, the samples with low and high pentosan content were identified at the linear, population and hybrid level in domestic and foreign gene pools. It was shown that Russian population varieties and high-pentosan lines selected at Tatar Research Institute of Agriculture stood out due to high rates of general pentosan level and extracted viscosity. The relationship between VWE and the content of water-soluble pentosans in the studied quantitative limits with a high probability (95 %) has a rectilinear character. In low pentosans lines originated from Tatar Research Institute of Agriculture VWE amounted to 6.40- of 6.45 centistokes (sSt), in the domestic population varieties VWE ranged from 15.40 to 34.50 sSt, and in hybrid varieties from Germany VWE reached 47.50 sSt. So we have a gene pool sufficient for baking rye breeding. In high-pentosan forms, we found the high significant positive correlation between the total content of pentosans, viscosity of water extracts and water-soluble fraction. An indirect estimate of pentosans fraction through determination of the water extract viscosity of rye meal allows to start selection in the early steps of breeding and to analyze a large number of samples in a relatively short time. Further search is necessary to select donor lines with low total level of arabinoxylans and water-soluble fraction. It is difficult to phenotypically evaluate low-pentosans plants based on an indirect indicator of viscosity only. Low pentosan lines had a significant correlation between VWE and the water-soluble fraction ($r = 0.745$, $P = 0.05$). Heritability of water extract viscosity of grain meal was rather high ($H^2 = 0.71$), and genotypic variation coefficient reached 32.53 %, indicating advisability of VWE improving by breeding techniques. Heritability index of water-soluble pentosan content was 0.50, and genotypic coefficient of variation was 13.02 %, so the impact of breeding on these indicators should be low. The presented genotypic variability parameters are applicable only to the genotypes used in our experiment. The smallest amounts of water-soluble pentosans in flour and meal were characteristic of the Russian varieties Marusenka, Ogonek, Chulpan 7. We revealed a low content of water-soluble fraction in the bran in variety Ogonek. To distinguish rye genotypes more precisely, it is necessary to develop effective tests which will allow to assess water absorption, viscosity and solubility of pentosans (high-molecular arabinoxylans) in addition to their quantitation in grain grind products.

Keywords: winter rye, pentosans, fractions, arabinoxylan, viscosity of water extract, meal, variety, lines, heritability, genotypic variability.

REFERENCES

1. Nilsson M., Aman P., Harkonen H., Hallmans G., Bach K.E. Nutrient and lignin content, dough properties and baking performance of rye samples used in Scandinavia. *Acta Agric. Scand., Select. B, Soil and Plant Sci.*, 1997, 47: 26-34 (doi: 10.1080/09064719709362435).
2. Andersson R., Fransson G., Tietjen M., Aman P. Content and molecular-weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread. *J. Agric. Food Chem.*, 2009, 57(5): 2004-2008 (doi: 10.1021/jf801280f).
3. Bach Knudsen K.E., Lærke H.N. Rye arabinoxylans: Molecular structure, physico-chemical properties and physiological effects in the gastrointestinal tract. *Cereal Chem.*, 2010, 87(4): 353-362 (doi: 10.1094/CCHEM-87-4-0353).
4. Izdorczyk M.S., Biliaderis C.G. Cereal arabinoxylans advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydr. Polym.*, 1995, 28: 33-48 (doi: 10.1016/0144-8617(95)00077-1).
5. Vinkx C.J.A., Delcou J.A. Rye (*Secale cereale* L.) arabinoxylans: A critical review. *Journal of Cereal Science*, 1996, 24(1): 1-14 (doi: 10.1006/jcsc.1996.0032).
6. Cui S.W., Wang Q. Cell wall polysaccharides in cereals: Chemical structures and functional properties. *Struct. Chem.*, 2009, 20(2): 291-297.
7. Bengtsson S., Andersson R., Westerlund E., Aman P. Content, structure and viscosity of soluble arabinoxylans in rye grain from several countries. *J. Sci. Food Agr.*, 1992, 58(3): 331-337 (doi: 10.1002/jsfa.2740580307).
8. Wang M.W., Vliet T.V., Hamer R.J. How gluten properties are affected by pentosans. *J. Cereal Sci.*, 2004, 39: 395-402 (doi: 10.1016/j.jcs.2004.02.002).
9. Jankiewicz M., Michniewicz J. The effect of soluble pentosans isolated from rye grain on staling of bread. *Food Chem.*, 1987, 25: 241-249 (doi: 10.1016/0308-8146(87)90010-0).
10. Bonnand-Ducasse M., Della Valle G., Lefebvre J., Saulnier L. Effect of wheat dietary fibers on bread dough development and rheological properties. *J. Cereal Sci.*, 2010, 52(2): 200-206 (doi: 10.1016/j.jcs.2010.05.006).
11. Buksa K., Nowotna A., Praznik W., Gambuś H., Ziobro R., Krawontka J. The role of pentosans and starch in baking of wholemeal rye bread. *Food Res. Int.*, 2010, 43:

- 2045-2051 (doi: 10.1016/j.foodres.2010.06.005).
12. Hartmann G., Michael P., Peter K. Isolation and chemical characterization of water-extractable arabinoxylan from wheat and rye during bread making. *Eur. Food Res. Technol.*, 2005, 221: 487-492 (doi: 10.1007/s00217-005-1154-z).
 13. Ragaee S.M., Campbell G.J., Scoles G. J., McLeod J.G., Tyler R.T. Studies on rye (*Secale cereale* L.) lines exhibiting a range of extract viscosities. 2. Rheological and baking characteristics of rye and rye/wheat blends and feeding value for chicks of wholemeals and breads. *J. Agr. Food Chem.*, 2001, 49: 2446-2453 (doi: 10.1021/jf0012289).
 14. Antoniou T., Marquardt R.R., Cansfield P.E. Isolation, partial characterization, and antinutritional activity of a factor (rentosans) in rye grain. *J. Agr. Food Chem.*, 1981, 29: 1240-1247 (doi: 10.1021/jf00108a035).
 15. McLeod J.G., Gan Y., Scoles G.J. Extract viscosity and feeding quality of rye. *Votr. Pflanzenzucht*, 1996, 35: 97-108.
 16. Boros D., Marquardt R.R., Slominski B.A., Guenter W. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosans content in rye. *Cereal Chem.*, 1993, 70: 575-580.
 17. Jürgens H.-U., Jansen G., Wegener C.B. Characterisation of several rye cultivars with respect to arabinoxylans and extract viscosity. *J. Agr. Sci.*, 2012, 4(5): 1-12 (doi: 10.5539/jas.v4n5p1).
 18. Goncharenko A.A., Timoshchenko A.S., Berkutova N.S. Viscosity of grain water extract in winter rye as universal parameter during breeding on principal use. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2007, 3: 44-49 (in Russ.).
 19. Goncharenko A.A., Ismagilov R.R., Berkutova N.S., Vanyushina T.N., Ayupov D.S. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2005, 1: 6-9 (in Russ.).
 20. Cyran M.R., Ceglinska A. Genetic variation in the extract viscosity of rye (*Secale cereale* L.) bread made from endosperm and wholemeal flour: Impact of high-molecular-weight arabinoxylan, starch and protein. *J. Sci. Food Agr.*, 2011, 91(3): 469-479 (doi: 10.1002/jsfa.4208).
 21. Gil'mullina L.F., Ponomarev S.N., Ponomareva M.L. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ozimaya rozh': selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya i pererabotka»* [Proc. Conf. «Winter rye: breeding, seed production, agrotechnology, and processing]. Ekaterinburg, 2012: 54-59 (in Russ.).
 22. Goncharenko A.A., Ermakov S.A., Makarov A.V., Semenova T.V., Tochilin V.N., Tsygankova N.V. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*, 2011, 5: 11-19 (in Russ.).
 23. Gan Y.T., McLeod J.G., Scoles G.L., Campbell G.L. Extract viscosity of winter rye: variation with temperature and precipitation. *Canadian Journal of Plant Science*, 1997, 77(4): 555-560 (doi: 10.4141/P96-129).
 24. Finnie S.M., Bettge A.D., Morris C.F. Influence of cultivar and environment on water-soluble and water insoluble arabinoxylans in soft wheat. *Cereal Chem.*, 2006, 83(6): 617-623 (doi: 10.1094/CC-83-0617).
 25. Li S., Morris C.F., Bettge A.D. Genotype and environment variation for arabinoxylans in hard winter and spring wheat of the U.S. Pacific Northwest. *Cereal Chem.*, 2009, 86: 88-95 (doi: 10.1094/CCHEM-86-1-0088).
 26. Hansen H.B., Rasmussen C.V., Bach Knudsen K.E., Hansen A. Effects of genotype and harvest year on content and composition of dietary fibre in rye (*Secale cereale* L.) grain. *J. Sci. Food Agr.*, 2003, 83(1): 76-85 (doi: 10.1002/jsfa.1284).
 27. Martinant J.P., Billot A., Bouguennec A., Charmet G., Saulnier L., Branlard G. Genetic and environmental variations in water-extractable arabinoxylans content and flour extract viscosity. *J. Cereal Sci.*, 1999, 30(1): 45-48 (doi: 10.1006/jcsc.1998.0259).
 28. Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Gil'mullina L.F., Mannapova G.S. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2015, 29 (11): 32-35 (in Russ.).
 29. Hashimoto S., Shogren M.D., Pomeranz Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products. *Cereal Chem.*, 1987, 64(1): 30-34.
 30. Delcour J.A., Vanhamel S., De Geest C. Physico-chemical 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, 66(2): 107-111.
 31. Gomez K.A., Gomez A.A. *Statistical procedures for agricultural research*. J. Wiley and Sons, NY, 1984: 207-215.
 32. Burton G.W., DeVane E.H. Estimating of heritability in tall Fescue (*Festuca arundinacea*) from replicated clonal material. *Agronomy Journal*, 1953, 45: 478-481 (doi: 10.2134/agronj1953.00021962004500100005x).
 33. Rokitskii P.F. *Vvedenie v statisticheskuyu genetiku* [Introduction to statistical genetics]. Minsk, 1978: 226-278 (in Russ.).