

Морфологические особенности низкопентозанового зерна ржи

DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130



УДК 633.14: 575.22:581.82

Поступление/Received: 28.05.2020

Принято/Accepted: 12.05.2021

V. Д. КОБЫЛЯНСКИЙ¹, О. В. СОЛОДУХИНА^{1*},
И. М. НИКОНОВА²

¹ Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов
растений имени Н.И. Вавилова
190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44
* [✉ osolodukhina1953@gmail.com](mailto:osolodukhina1953@gmail.com)

² Башкирский научно-исследовательский институт
сельского хозяйства УФИЦ РАН,
450059 Россия, г. Уфа ул. Рихарда Зорге, 19
[✉ ilyusya.nikonorova@mail.ru](mailto:ilyusya.nikonorova@mail.ru)

Morphological features of rye grain with low pentosan content

V. D. KOBLYANSKY¹, O. V. SOLODUKHINA^{1*},
I. M. NIKONOROVA²

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
42, 44 Bolshaya Morskaya Street,
St. Petersburg 190000, Russia
* [✉ osolodukhina1953@gmail.com](mailto:osolodukhina1953@gmail.com)

² Bashkir Research Institute of Agriculture,
Ufa Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
19 R. Zorge St., Ufa 450059, Russia
[✉ ilyusya.nikonorova@mail.ru](mailto:ilyusya.nikonorova@mail.ru)

Актуальность. Покровы зерна ржи играют главную роль при создании сортов ржи, характеризующихся низким содержанием водорастворимых пентозанов (ВРП) в зерне. Тонкопокровность зерновки служит диагностическим признаком низкого содержания ВРП (арабиноксиланов). Для совершенствования технологии селекции низкопентозановой ржи приобретает значение изучение связи тонкопокровности ее зерна с морфологическими признаками.

Материалы и методы. Тонкопокровные стекловидноподобные зерна идентифицировали при помощи диафаноскопа ЛФС-1 в популяциях 7 сортов озимой ржи, районированных в РФ. Морфологические особенности покровов зерна изучали на толсто- и тонкопокровных зерновках, выявленных среди сортов 'Эра' и 'Вятка'. Препарирование зерна для определения толщины его покровов и алейронового слоя проводили по Л. Н. Любарскому.

Результаты и заключение. У тонкопокровного зерна ржи, по сравнению с толстопокровным, установлено уменьшение толщины перикарпия и семенной кожуры на 50–70% и алейронового слоя на 32,1–39,6% за счет не только клеточных стенок, но и межклеточного пространства. В тканях клеток эпидермы перикарпия содержится основное количество защитных биологически пассивных ВРП. Доказано отсутствие значимых изменений параметров зерновок по длине, ширине и условному объему в зависимости от их тонкопокровности. Достоверные отличия касались показателя «масса 1000 зерен». У стекловидноподобных (прозрачных) зерновок по сравнению с непрозрачными она увеличилась на 5,2–19,7 процентов.

Ключевые слова: *Secale cereale*, водорастворимые пентозаны, покровы и алейроновый слой зерновки.

Background. The grain coat plays a major role in the development of rye cultivars with low levels of water-soluble pentosans (WSP). Grain coat thinness is a diagnostic trait for low WSP (arabinoxylans) content. To improve the technology of low-pentosan rye breeding, it becomes important to study the effect of changes in the anatomy of low-pentosan grains on morphological characteristics.

Materials and methods. Grains with thin coats (transparent) were identified with the LFS-1 diaphanoscope in the population of 7 commercial winter rye cultivars grown in Russian Federation. Anatomical and morphological features of seed coats were studied on thick- and thin-coated grains identified in the rye cultivars 'Era' and 'Vyatka'. The thickness of grain coats and the aleurone layer were assessed according to L. N. Lyubarsky.

Results and conclusions. In thin-coated rye grains, we found a reduction in the thickness of the pericarp and seed coats by 50–70% and in the aleurone layer by 32.1–39.6%, compared to thick-coated grains. With a constant cell size in "transparent" grains, a decrease in the thickness of the aleurone layer and coat occurs at the expense of the reduction in not only the cell walls, but also the intercellular space. The pericarp in the tissues of the second multicellular layer contains the bulk of the protective biologically passive WSP. It was proved that there were no significant changes in grain parameters, such as length, width and relative volume, depending on coat thinness. Significant differences were found in the 1000 grain weight. In "transparent" grains the index increased by 5.2–19.7%, compared with "nontransparent" ones.

Key words: *Secale cereale*, water-soluble pentosans, grain coating, aleurone layer cells.

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется развитию нового направления в селекции ржи – созданию сортов универсального использования, характеризующихся низким содержанием водорастворимых пентозанов (ВРП) в зерне. Выявлено, что покровы зерна ржи играют главную роль в решении рассматриваемой проблемы. Известно, что 99% ВРП в зерне злаковых растений

локализовано в периферической части зерновки – перикарпии, семенной кожуре (спермодерме) и алейроновом слое, располагаясь в клеточных стенках и межклеточном пространстве (Kretovich, Petrova, 1951). Выявлена взаимообусловленная связь между количественным содержанием ВРП и толщиной покровов зерновки (Kobylyansky, Solodukhina, 2009). При селекции низкопентозановой ржи проведен поиск генотипов, характеризующихся уменьшенной толщиной покровов зерновки до мини-

мально возможных размеров. Установлено, что крайняя тонкопокровность зерна служит диагностическим признаком низкого содержания ВРП (арабиноксиланов). В наших экспериментах поиск исходного материала для селекции направлен на выявление образцов ржи из коллекции ВИР, в популяциях которых содержится наибольший процент низкопентозановых зерен. Среди изученных 502 коллекционных популяций и 60 сортов диплоидной яровой и озимой ржи российской селекции удалось обнаружить формы растений с крайне низким содержанием ВРП в зерне. Частота тонкопокровных зерен у разных сортов составляет от 12 до 70%.

У ржи тонкопокровная структура зерновки формируется вследствие уменьшения толщины перикарпия, семенной кожуры и алейронового слоя, что и приводит к проявлению «прозрачности» и ложной стекловидности. Изменение «оптических» свойств низкопентозановых зерен ржи можно наблюдать, пропуская через них световые лучи. Без просвечивания тонкопокровные зерна не выглядят стекловидными, в отличие от реально стекловидных зерен у пшеницы. При проявлении ложной стекловидности у ржи эндосперм зерна остается мучнистым.

По результатам биохимического анализа установили, что зерновки ржи с «прозрачными» покровами, содержали низкое количество ВРП (0,5–0,9%). Их диагностировали как низкопентозановые, а непрозрачные зерновки с высоким содержанием ВРП (1,0–3,0%) – как высокопентозановые (рис. 1).

Особо ценными для селекции на низкопентозановость являются рецессивное полигенное наследование признака и незначительная его изменчивость в зависимости от места и условий выращивания сортов (Kobylyansky, Solodukhina, 2009). Это позволяет в процессе селекции получать нерасщепляющиеся константные формы растений для разных зон возделывания ржи.

На основе научных разработок сотрудников ВИР совместно с селекционерами за период 2016–2020 гг. удалось создать первые низкопентозановые сорта озимой ржи, не имеющие мировых аналогов: 'Вавиловская', 'Берегиня', 'Подарок', 'Янтарная', 'Красноярская универсальная' и 'Новая Эра' (Korelina et al., 2017; Kobylyanskii et al., 2019a). Низкопентозановость зерна этих сортов определяет их универсальное использование в комбикормовой,

хлебопекарной и перерабатывающей промышленности (Kobylyansky et al., 2017; Kobylyansky et al. 2019b). Созданные низкопентозановые сорта содержат более 90% тонкопокровных зерен.

По сообщению А. А. Гончаренко с соавторами (Goncharenko et al., 2020), высокое содержание некрахмальных полисахаридов (ВРП) в зерне хлебопекарных сортов ржи отрицательно сказывается на его крупобразующей способности.

Учитывая этот факт, можно предположить, что зерно ржи с низким содержанием ВРП пригодно для использования и в крупяной промышленности.

Предшествующие исследования структуры зерна классической (хлебопекарной) ржи были посвящены его использованию преимущественно в мукомольной и хлебопекарной промышленности и направлены на поиск и разработку более эффективных технологий его переработки. Большое внимание уделено анатомо-морфологическим особенностям «оболочек», покрывающих эндосперм (мучную часть зерновки), и находящемуся на его периферии алейроновому слою. Специалисты в области хлебопечения, изучив покровы зерновок, пришли к заключению, что «... оболочки зерна, выполняя различные функции в процессе его жизненного цикла, в то же время являются крайне нежелательным балластом при его размоле» (Lyubarsky, 1957, p. 56).

Существуют данные о связи анатомо-морфологических признаков и качества зерна хлебных злаков (Stepanov, 2001).

Для совершенствования технологии селекции низкопентозановой ржи приобретает значение изучение связи тонкопокровности ее зерна с морфологическими признаками.

Материалы и методы

Морфологические особенности покровов зерна изучали на толсто- и тонкопокровных зерновках, выявленных среди сортов 'Эра' и 'Вятка'. Препарирование зерна для определения толщины перикарпия, семенной кожуры и алейронового слоя проводили методом № 1 «прямого разделения зерна на его составные части» (Lyubarsky, 1957).

Идентификацию и отбор тонкопокровных зерновок, проявляющих ложную стекловидность («прозрач-

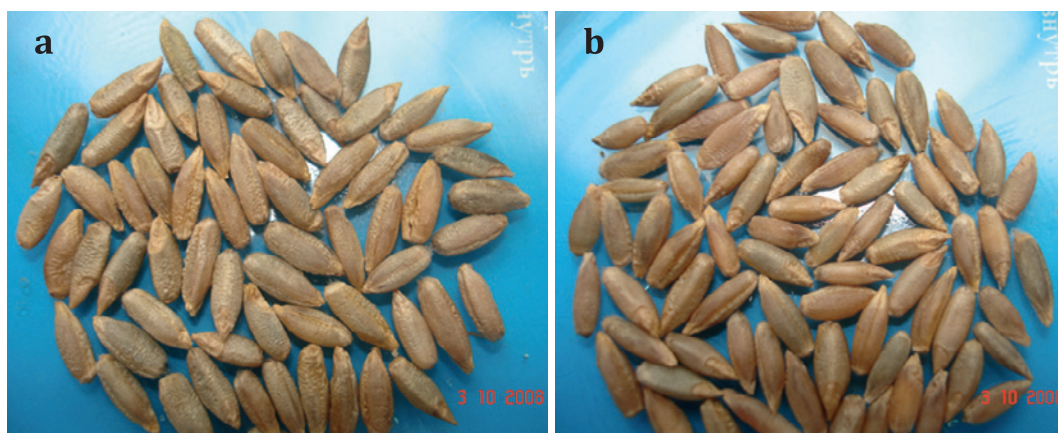


Рис. 1. Зерновки ржи с различным содержанием водорастворимых пентозанов:

- (а) непрозрачные морщинистые зерновки с содержанием водорастворимых пентозанов – 2,2%,
(б) прозрачные (стекловидноподобные) зерновки с содержанием водорастворимых пентозанов – 0,5%

Fig. 1. Rye grains differing in the content of water-soluble pentosans:

- (a) nontransparent wrinkled grains with the water-soluble pentosan content of 2.2%,
(b) transparent (quasi-vitreous) grains with the water-soluble pentosan content of 0.5%

ность») осуществляли визуально при помощи лабораторного цилиндрического диафаноскопа ЛФС-1, используемого для определения настоящей стекловидности зерна пшеницы.

Изучение линейных показателей параметров целого зерна проводили на зерновках у 7 произвольно взятых сортов, районированных в РФ. Для этих целей использовали фракции толсто- и тонкопокровных зерен по 20 штук каждого сорта. Промеры длины, ширины (между боковыми поверхностями) и высоты (от бороздки до спинки) зерновок осуществляли при помощи штангенциркуля КАЛИБРОН ШЦ-I 0,125 0,1. Условный объем зерновок рассчитывали по формуле определения объема эллипсоида, близкого по форме к зерновке ржи, а именно:

$$V = \frac{3}{4} \pi \times a \times b \times c, \text{ где}$$

a = длина зерновки /2, мм;

b = ширина зерновки /2, мм;

c = высота зерновки /2, мм.

Следует отметить особо, что из массы зерна каждого сорта взяты случайные зерна из каждой фракции. Кроме линейных параметров зерновок и вычисления их условного объема, определяли массу 1000 зерен. Учитывая тот факт, что зерновки имели одинаковые линейные размеры ширины и высоты, в таблице 2 представлены только показатели ширины.

Для статистической обработки экспериментальных данных использовали селекционно ориентированную программу AGROS (версия 2.09) и пакет прикладных программ Microsoft Excel 7.0.

Результаты и обсуждение

Первые наблюдения свидетельствовали об изменениях в структуре покровов зерновки и алейронового

слоя у низкопентозановой ржи. Строение зерновки ржи, а также названия ее частей и термины, используемые в исследованиях ботаников и селекционеров, типичны для всех хлебных злаков (Esau, 1980; Takhtajan, 1985). Покровы как высокопентозановой, так и низкопентозановой ржи состоят из перикарпия и семенной кожуры (рис. 2), которые защищают ржаное зерно от внешних воздействий, тем самым предохраняя зародыш от попадания в него вредных, ядовитых веществ и механических повреждений, пропускают внутрь зерна воздух и кислород при определенных условиях, что имеет большое значение при прорастании зерна.

Перикарпий покрывает всю поверхность зерновки, кроме зародыша. Он состоит из слоев клеток, различающихся по строению и функциям. В перикарпий входят: наружная эпидерма (экзокарпий), средние слои клеток (мезокарпий) и внутренняя эпидерма (эндокарпий). Толщина перикарпия у толстопокровных зерновок с высоким содержанием ВРП составляет 63–71 микрон, а у тонкопокровных низкопентозановых зерновок – почти в два раза меньше (табл. 1).

Экзокарпий, состоящий из полупрозрачных, вытянутых вдоль зерновки клеток, осуществляет общую защитную роль. Верхний слой состоит из одного ряда клеток, ниже лежащий неоднороден в разных местах по числу рядов клеток. Число рядов варьирует от одного-двух до шести вблизи зародыша и более шести около бороздки зерновки. Присутствуют склеренхимные клетки с крупными межклетниками, в которых содержатся в значительных количествах полимерные высокомолекулярные пентозаны. Кроме механической защиты, в связи с наличием большого количества полимерных пентозанов, экзокарпий служит биологической защитой от поедания зерен птицами и полевыми грызунами. У непрозрачных высокопентозановых зерновок покровы грубые и, как правило, в разной степени морщинистые. Животные

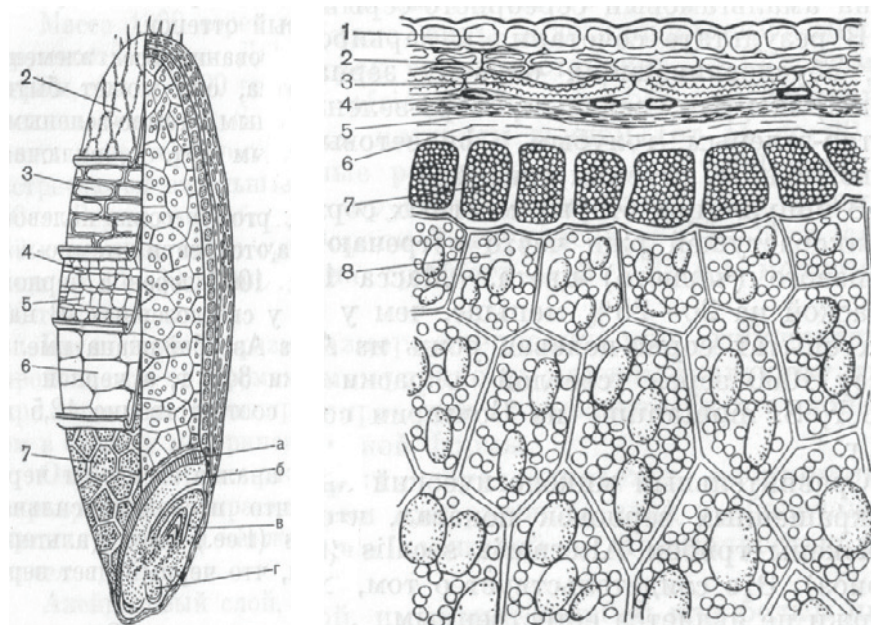


Рис. 2. Схема структуры зерновки ржи (по В. Д. Кобылянскому, 1982)

1, 2, 3 – слои клеток перикарпия; 4, 5, 6 – слои клеток семенной кожуры; 7 – алейроновый слой (максимальная локализация ВРП); 8 – эндосперм; а, б, в, г – зародыш зерновки

Fig. 2. The scheme of the rye grain structure (from V. D. Kobylansky, 1982)

1, 2, 3 – layers of pericarp cells; 4, 5, 6 – layers of spermoderm cells; 7 – aleurone layer (maximum localization of WSP); 8 – endosperm; а, б, в, г – grain germ

Таблица 1. Толщина перикарпия, семенной кожуры и алейронового слоя зерновок ржи сортов 'Эра' и 'Вятка', различающихся по толщине покровов (мкм)**Table 1.** The thickness of the pericarp, spermoderm and the aleurone layer in rye grains of cvs. 'Era' and 'Vyatka', differing in grain coat thickness (microns)

Покровы зерновки и алейроновый слой	Варьирование толщины покровов и алейронового слоя зерновки, мкм		Степень уменьшения толщины оболочек и алейронового слоя у тонкопокровных зерновок, мкм
	толстопокровная	тонкопокровная	
Перикарпий:	63 – 71	38 – 51	20 – 25
Экзокарпий (продольные клетки)	31 – 39	19 – 23	12 – 16
Мезокарпий (поперечные клетки); Эндокарпий (трубчатые клетки)	31 – 32	19 – 28	4 – 12
Семенная кожура	31 – 41	19 – 25	12 – 16
Алейроновый слой	53 – 56	32 – 38	18 – 21

и птицы интуитивно распознают высокопентозановое зерно и не употребляют его в пищу. При этом животные поедают такое зерно в фазу его молочной спелости, когда ВРП находятся в мономерном низкомолекулярном состоянии. У низкопентозановых зерновок ржи клетки экзокарпия имеют тонкие стенки, что способствует их высокой прозрачности, а сама зерновка выглядит гладкой. Отличительная особенность такого зерна в том, что оно охотно поедается всеми видами животных вне зависимости от уровня его спелости, и это проверено опытным путем (Lunegova et al., 2014).

Следующие два слоя клеток различаются по расположению, форме и функциям. Средний слой (мезокарпий) состоит из плоских продолговатых (поперечных) клеток с одревесневшими стенками, вытянутых поперек зерновки. Следующий под ним слой (эндокарпий) имеет трубчатые (мешковидные) клетки, расположенные вдоль зерновки. Оба слоя клеток (поперечных и трубчатых) лежат плотно к друг другу и также плотно прилегают к семенной кожуре, распложенной под ними. Они выполняют функцию накопления воды при набухании зерновок и диффузной передаче семенной кожуре при прорастании зародыша. В связи с тем, что ВРП находятся в перикарпии зерновки, то есть за пределами зародыша, пентозаны не участвуют в обмене веществ при прорастании зерна.

Семенная кожура (спермодерма) состоит из трех «кутикулярных» слоев продольных прозрачных клеток, с внешней стороны покрытых слоем кутина, образующего гладкую глянцевую поверхность и пропускающего только диффузную влагу. В наших экспериментах наблюдали, что семенная кожура зерна не пропускала спирт и ацетон в течение 2,5 часов. Нижняя сторона спермодермы плотно примыкает к находящемуся под ней гиалиновому слою непрозрачных набухающих клеток, происходящих из нуцеллуса (перисперма), которые так же плотно прилегают к алейроновому слою эндосперма. У низкопентозановых зерновок клетки гиалинового слоя прозрачные, что увеличивает прозрачность всей зерновки. Семенная кожура осуществляет защиту зародыша и обеспечение его диффузной влагой при прорастании. Подобным образом диффузной влагой обеспечивается алейроновый слой и остальной эндосперм. В нашем эксперименте толщина семенной кожуре у толстопокров-

ных зерновок сортов 'Эра' и 'Вятка' составляла 31–41 мкм, у тонкопокровных – 19–25 мкм.

Наибольшая толщина покровов зерновки ржи формируется в период начала желтой (восковой) спелости. В фазу завершения роста зерновки, в конце молочной – начале восковой спелости, она начинает уменьшаться, достигая постоянных размеров. Перед созреванием зерна происходит завершающий рост тканей и перераспределение остаточных обменных веществ в межклеточное пространство перикарпия и семенной кожуре (Aleksandrov, Aleksandrova, 1948). Во время этого процесса под действием собственных ферментов пентозаны из мономерных физиологически активных переходят в полимерные высокомолекулярные формы. Слои перикарпия и спермодермы уплотняются. При этом зерновки, содержащие большое количество пентозанов, образуют толстые, а при малом их содержании – тонкие покровы. Замечено, что уменьшение толщины каждого слоя происходит по причине уменьшения объема клеток и межклеточных пространств. В наших исследованиях суммарная толщина перикарпия и семенной кожуре у «прозрачных» зерновок ржи варьировала в пределах 57–76 мкм, у непрозрачных зерновок – 94–112 мкм. Аналогичная тенденция прослеживалась и при изучении зерен у сортов мягкой пшеницы при изучении истинной стекловидности (Fedotov, 2017).

Алейроновый слой является периферической частью эндосперма и не относится к числу покровов зерновки. У зерна ржи алейроновый слой состоит из одного ряда крупных толстостенных клеток с большими межклеточными. С внешней стороны он плотно прилегает к гиалиновому слою семенной кожуре. Функция алейронового слоя состоит в обеспечении зародыша влагой, водоразводимыми пентозанами, питательными веществами и ферментами. Следует отметить, что по содержанию основных химических веществ, особенно пентозанов, он превосходит все ткани зерновки. Количество пентозанов увеличивается по мере роста алейронового слоя зерновки и составляет около 30% от его массы. В это время пентозаны находятся в активном мономерном состоянии и не образуют липкие слизи. По завершению роста зерновки в начале восковой спелости они переходят в полимерное высокомолекулярное состояние. Толщина алейронового слоя зерновки с высоким содержанием ВРП

варьировала от 53 до 56 мкм, а у ложностекловидных низкопентозановых зерновок – от 32 до 38 мкм (см. табл. 1). Впервые это явление у ржи было отмечено при изучении верхних слоев эндосперма у стекловидноподобных и мучнистых зерновок, различающихся по количеству белка и крахмала, у сорта 'Вятка'. Клетки алейронового слоя у «стекловидных» зерновок имели перегородки толщиной 3 мкм, а у мучнистых – 6,1 мкм (Ророва, 1979).

Проведенные исследования толщины покровов зерновок ржи позволили объяснить основную причину возникновения тонкопокровности. Проявление тонкопокровности зерновки обусловлено уменьшением толщины тканей перикарпия, семенной кожуры и алейронового слоя. Полученные данные подтвердили установленную причинно-следственную связь между «прозрачностью» зерна и низким содержанием в нем водорастворимых пентозанов. Иными словами, толщина покровов

зерновки «влияет» на содержание в них водорастворимых пентозанов (Kobylyansky, Solodukhina, 2009). Для детального рассмотрения установленных закономерностей нами планируется сравнительное анатомо-морфологическое изучение зерна (в том числе и в онтогенезе), различающегося по тонкопокровности.

С целью выявления изменчивости морфологических признаков было проведено изучение фракций зерна альтернативных по прозрачности и толщине покровов у произвольно взятых районированных сортов ржи, содержащих непрозрачные (НПР) толстопокровные и прозрачные (ПР) тонкопокровные зерновки (табл. 2). Частота прозрачных зерен в популяциях сортов колебалась от 24 до 60%. Больше всего низкопентозановых (прозрачных) зерен встречалось у сорта 'Синильга'.

Проведенные исследования не выявили статистически значимых различий между прозрачными и непрозрачными зерновками по длине, ширине, высоте

Таблица 2. Основные параметры зерновок ржи, различающихся по прозрачности оболочки

Table 2. Main parameters of rye grains differing in grain coat transparency

Сорт (количество прозрачных зерен, %)		Длина		Ширина		Условный объем		Масса 1000 зерен	
		мм	V, %	мм	V, %	мм ³	V, %	г	+ / - к НПР
Былина (30)	НПР	6,84 ± 0,16	3,21	2,14 ± 0,09	8,90	16,40 ± 2,12	18,08	26,7	
	ПР	7,29 ± 0,14*	2,65	1,95 ± 0,10	10,62	14,39 ± 1,45	14,05	28,1*	+1,4
	НСР ₀₅	0,27		0,26		2,25		0,95	
Таловская 44 (24)	НПР	7,47 ± 0,40	7,64	2,46 ± 0,18	15,82	23,13 ± 2,65	16,01	30,3	
	ПР	7,37 ± 0,33	6,35	2,40 ± 0,09	8,39	22,20 ± 2,51	15,83	32,2*	+1,9
	НСР ₀₅	0,48		0,40		3,43		0,93	
Енисейка (40)	НПР	6,67 ± 0,34	7,2	1,93 ± 0,11	12,11	13,17 ± 2,55	27,12	24,7	
	ПР	6,76 ± 0,55	11,4	1,96 ± 0,08	8,36	13,67 ± 2,10	21,47	26,9*	+2,2
	НСР ₀₅	0,57		0,27		3,10		0,95	
Тантана (34)	НПР	7,12 ± 0,26	5,01	2,05 ± 0,09	9,16	15,85 ± 2,55	22,55	27,2	
	ПР	7,39 ± 0,33	6,34	2,18 ± 0,08	8,25	18,53 ± 2,36	17,80	30,0*	+2,8
	НСР ₀₅	0,41		0,24		3,27		0,93	
Таловская 33 (36)	НПР	7,27 ± 0,15	2,93	2,27 ± 0,07	6,65	19,56 ± 1,35	9,68	30,1	
	ПР	7,36 ± 0,30	5,73	2,18 ± 0,10	10,21	18,68 ± 3,28	24,55	33,0*	+2,9
	НСР ₀₅	0,43		0,31		4,05		0,93	
Синильга (60)	НПР	6,85 ± 0,38	7,79	1,85 ± 0,08	8,90	12,25 ± 1,51	17,30	19,8	
	ПР	6,93 ± 0,44	8,83	1,96 ± 0,09	9,39	14,02 ± 1,73	17,13	23,7*	+3,9
	НСР ₀₅	0,54		0,23		2,27		0,95	
Эра (43)	НПР	7,28 ± 0,38	7,31	2,31 ± 0,08	7,52	20,35 ± 2,20	15,10	34,7	
	ПР	7,72 ± 0,58	10,4	2,29 ± 0,05	4,85	21,25 ± 1,98	13,02	36,4*	+1,7
	НСР ₀₅	0,67		0,18		2,73		0,93	

Примечание: НПР (оболочки непрозрачные); ПР (оболочки прозрачные); V – коэффициент вариации; НСР₀₅ – наименьшая существенная разница при уровне значимости $p < 0,05$; * отклонение существенно при 5% уровне значимости

Note: НПР (nontransparent grain coat); ПР (transparent grain coat); V – coefficient of variation; НСР₀₅ – the lowest significant difference at $p < 0.05$; * deviation is significant at 5% level of significance

и условному объему у всех изученных сортов, о чем свидетельствовали показатели НСР. Достоверные изменения касались только массы 1000 зерен. Так, у прозрачных зерновок, по сравнению с непрозрачными, она увеличилась на 1,4–3,9 г или на 5,2–19,7%, в зависимости от сорта (рис. 3). Это можно объяснить увеличением доли тяжеловесного крахмало-белкового эндосперма и уменьшением доли «легковесных» покровов у «прозрачных» (тонкопокровных) зерновок.

щихся по структуре тканей, определяющих различное содержание ВРП в зерне. Оба класса находятся в тесном взаимодействии внутри единой генетической системы, контролирующей наследование и изменчивость признаков растений. При внутривидовом скрещивании альтернативных групп растений не образуется промежуточных рекомбинантов по содержанию ВРП. При расщеплении гибридов идентифицируются только растения, полностью соответствующие одной из двух возможных

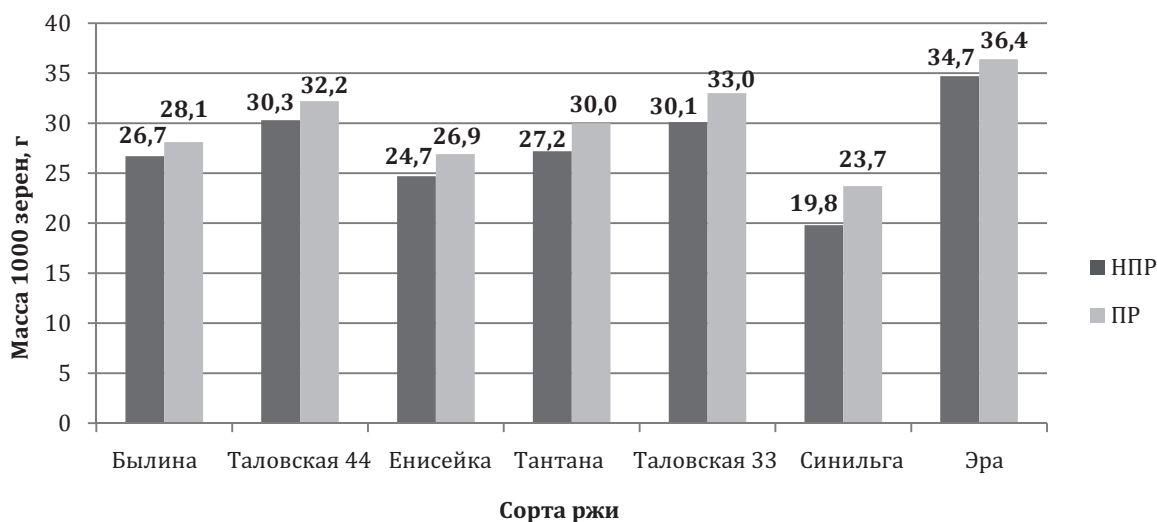


Рис. 3. Масса 1000 зерен «прозрачных» (ПР) и «непрозрачных» (НПП) зерновок, выявленных в популяциях сортов ржи

Fig. 3. Weight of 1000 grains for “transparent” (ПР) and “nontransparent” (НПП) grain types identified in populations of rye cultivars

Заключение

Проявление тонкопокровности зерновки обусловлено уменьшением толщины тканей перикарпия, семенной кожуры и алейронового слоя, приводящим к уменьшению содержания в них водорастворимых пентозанов.

Экспериментально доказано отсутствие существенных изменений основных показателей параметров зерновок (длины, ширины, условного объема) в зависимости от их тонкопокровности. Эти изменения не выходили за пределы статистической ошибки опыта.

Значимые изменения касались только показателей массы 1000 зерен. У тонкопокровных стекловидноподобных зерновок она достоверно увеличилась на 5,2–19,7% в зависимости от изучаемого сорта.

Незначительное влияние тонкопокровности на морфологические особенности низкопентозанового зерна можно считать положительным фактором при селекции универсальной ржи. Это свидетельствует о том, что у нового типа низкопентозановых растений, выделенных из популяций классической высокопентозановой ржи, низкое содержание ВРП не влияет отрицательно на размер зерна и, следовательно, на продуктивность колоса.

Изменения в структуре тканей зерна ржи, связанные с изменением количества пентозанов, распространяются и на другие органы растений. Подтверждением этому служит факт создания низкопентозановых сортов, состоящих на 90% и более из стекловидноподобных зерновок.

Наши наблюдения позволяют утверждать, что современные популяции ржи состоят из двух самостоятельных равноценных классов растений, четко различаю-

форм. Каждый тип растений (с высоким или низким содержанием ВРП в зерне) может существовать как в виде самостоятельных равноценных популяций, так и в виде смешанной популяции ржи. Методами селекции изучаемые популяции сортов могут быть разделены на отдельные субпопуляции, каждая из которых состоит из разных обособленных форм растений. При создании низкопентозановых сортов отбирают формы ржи со стекловидноподобным низкопентозановым зерном. Это позволяет за короткий срок (3 года) создать популяцию нового низкопентозанового сорта. Для этой цели большой интерес представляет сорт ‘Синильга’, содержащий 60% низкопентозановых зерен.

Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0662-2019-0006 «Поиск, поддержание жизнеспособности и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития, оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

The research was performed within the framework of the State Task according to the theme plan of VIR, Project No. 0662-2019-0006 “Search for and viability maintenance, and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and great crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production”.

References / Литература

- Aleksandrov V.G., Aleksandrova O.G. Anatomy of the wheat grain (*Anatomiya zernovki pshenitsy*). *Trudy Botanicheskogo instituta imeni V.L. Komarova = Proceedings of the Komarov Botanical Institute*. 1948;1(7):263-334. [in Russian] Александров В.Г. Александрова О.Г. Анатомия зерновки пшеницы. *Труды Ботанического института имени В.Л. Комарова*. 1948;1(7):263-334.
- Esau K. Anatomy of seed plants. Book 2. Translated by A.E. Vasilyev et al. Moscow: Mir; 1980. [in Russian] (Эзау К. Анатомия семенных растений. Книга 2. Перевод А.Е. Васильева и др. Москва: Мир; 1980).
- Fedotov V.A. Connection of morphological and anatomical characteristics of wheat grain with technological properties. *International Research Journal* 2017;12-5(66):175-178. [in Russian] (Федотов В.А. Связь морфолого-анатомических характеристик зерна пшеницы с технологическими свойствами. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;12-5(66):175-178). DOI: 10.23670/IRJ.2017.66.139
- Goncharenko A.A., Makarov A.V., Kuzmich M.A., Ermakov S.A., Semenova T.V., Tochilin V.N. et al. Comparative assessment of varieties of winter rye on groats forming ability. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;(1):3-10. [in Russian] (Гончаренко А.А., Макаров А.В., Кузьмич М.А., Ермаков С.А., Семенова Т.В., Тоцилин В.Н. и др. Сравнительная оценка сортов озимой ржи по крупобразующей способности. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020;(1):3-10). DOI: 10.31857/S2500-2627-2020-1-3-10
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V., Lunegova I.V., Novikova S.P., Хлопчук М.С., Макаров В.И. Rye breeding for low-pentosans and possibility of its use in animal feeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(1):31-40. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В., Лунегова И.В., Новикова С.П., Хлопчук М.С., Макаров В.И. Создание низкопентозановой ржи и возможности ее использования на корм животным. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(1):31-40). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-1-31-40
- Kobylyanskii V.D., Solodukhina O.V. Timina M.A., Plekhanova L.V., Kolichenko A.A., Lomova T.G. New variety of winter rye 'Krasnoyarskaya Universalnaya'. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019a;33(7):13-16. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В., Тимина М.А., Плеханова Л.В., Количенко А.А., Ломова Т.Г. Новый сорт озимой ржи Красноярская универсальная. *Достижения науки и техники АПК*. 2019a;33(7):13-16). DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10703
- Kobylyansky V.D. Rye. Genetic bases of breeding (Rozh. Geneticheskiye osnovy seleksii). Moscow: Kolos; 1982. [in Russian] (Кобылянский В.Д. Рожь. Генетические основы селекции. Москва: Колос; 1982).
- Kobylyansky V.D., Kuznetsova L.I., Solodukhina O.V., Lavrentyeva N.S., Timina M.A. Prospects of using low-pentosan grain fodder rye for baking purposes. *Russian Agricultural Sciences*. 2019b;45(1):1-4. DOI: 10.3103/S1068367419010063
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V. Bases of low pentosan rye breeding. *Bulletin of Applied Botany, of Genetics and Plant Breeding*. 2009;166:112-118. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Основы селекции малопентозановой ржи. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2009;166:112-118).
- Korelina V.A., Batakova O.B., Zobnina I.V., Kobylyanskiy V.D., Solodukhina O.V. 'Bereginya' as the first winter rye variety for multiple use. *Fodder Production*. 2017;(3):22-25. [in Russian] (Корелина В.А., Батакова О.Б., Зобнина И.В., Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Берегиня – первый сорт озимой ржи универсального использования. *Кормопроизводство*. 2017;(3):22-25).
- Kretovich V.L., Petrova I.S. Rye grain mucus and its technological significance. (Slizi rzhanogo zerna i ikh tekhnologicheskoye znachenie). *Biokhimiya zerna = Grain Biochemistry*. 1951;13(1):145-159. [in Russian] (Кретович В.Л., Петрова И.С. Слизи ржаного зерна и их технологическое значение. *Биохимия зерна*. 1951;13(1):145-159).
- Lunegova I.V., Kobylyanskii V.D., Solodukhina O.V. Rye with low pentose – valuable concentrated feed for animal. *International Bulletin of Veterinary Medicine*. 2014;(2):30-37. [in Russian] (Лунегова И.В., Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Низкопентозановое зерно ржи – ценный концентрированный корм для животных. *Международный вестник ветеринарии*. 2014;(2):30-37).
- Lyubarsky L.N. Rye (biological and technological grain properties) (Rozh [biologo-tekhnologicheskiye svoystva zerna]). Moscow: Khlebizdat; 1956. [in Russian] (Любарский Л.Н. Рожь (биолого-технологические свойства зерна). Москва: Хлебиздат; 1956).
- Popova E.P. Microstructure of grain and seeds (Mikrostruktura zerna i semyan). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Попова Е.П. Микроструктура зерна и семян. Москва: Колос; 1979).
- Stepanov S.A. Wheat morphogenesis: anatomical and physiological aspects (Morfogenez pshenitsy: anatomicheskiye i fiziologicheskiye aspekty). Saratov: Slovo; 2001. [in Russian] (Степанов С.А. Морфогенез пшеницы: анатомические и физиологические аспекты. Саратов: Слово; 2001).
- Takhtajan A.L. (ed.). Comparative anatomy of seeds (Srvnitelnaya anatomiya semyan). Vol. 1. Monocots (Odnodolnye). Leningrad: Nauka; 1985. [in Russian] (Сравнительная анатомия семян. Т. 1. Однодольные / под ред. А.Л. Тахтаджяна. Ленинград: Наука; 1985).

Прозрачность финансовой деятельности / The transparency of financial activities

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

The authors declare the absence of any financial interest in the materials or methods presented.

Для цитирования / How to cite this article

Кобылянский В.Д., Солодухина О.В., Никонорова И.М. Морфологические особенности низкопентозанового зерна ржи. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021; 182(2):123-130. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130

Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V., Nikonorova I.M. Morphological features of rye grain with low pentosan content. Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2021; 182(2):123-130. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы / The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Дополнительная информация / Additional information

Полные данные этой статьи доступны / Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-2-123-130>

Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы / The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer

Авторы одобрили рукопись / The authors approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует / No conflict of interest

ORCID

Kobylyansky V.D. <https://orcid.org/0000-0003-2193-8105>

Solodukhina O.V. <https://orcid.org/0000-0003-3117-6693>

Nikonorova I.M. <https://orcid.org/0000-0001-6883-7593>