

Обзорная статья
УДК 633.14:631.527:581.19
DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-03



Принципы селекции ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов в зерне

О. В. Солодухина

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Солодухина, osolodukhina@yandex.ru

Озимая рожь – вторая после пшеницы хлебная культура. По питательной ценности белка превосходит другие зерновые культуры за счет высокого содержания лизина, метионина, валина и сбалансированности по другим незаменимым аминокислотам. Прямое использование зерна хлебопекарной ржи на корм животным ограничивают содержащиеся в нем водорастворимые пентозаны (арабиноксиланы). Поэтому создание низкопентозановой ржи с высокопитательным зерном – перспективное направление в селекции зернофуражных сортов. Под руководством и при непосредственном участии В.Д. Кобылянского в ВИР имени Н.И. Вавилова за период 2004-2021 годов разработана технология селекции низкопентозановой ржи универсального использования. Выявлена связь пониженного содержания пентозанов с тонкопокровностью зерен. Предложен эффективный метод идентификации низкопентозановых генотипов по признаку тонкопокровности зерновки. Этим методом исследованы 562 образца из коллекции ВИР, представленные популяциями сортовой, сорно-полевой и дикорастущей ржи. Установлено, что количество тонкопокровных зерен, в зависимости от образца, варьирует от 12 до 70%. Сорта, имеющие наибольшую частоту низкопентозановых генотипов, могут служить исходным материалом для селекции. Установлена зависимость низкого содержания водорастворимых пентозанов в зерне от экспрессии рецессивных аллелей гена/генов, ответственных за проявление признака. Для создания зернофуражных сортов предложено использовать метод накопительных внутрипопуляционных скрещиваний и метод попарного переопыления растений с индикаторными колосьями. Созданы популяционные сорта низкопентозановой ржи универсального использования: 'Вавиловская', 'Берегиня', 'Подарок', 'Янтарная', 'Красноярская универсальная', 'Новая Эра' и 'Арга'. Эти сорта характеризуются низким, как у пшеницы, содержанием пентозанов. Они прошли оценку в основных зонах выращивания ржи, испытаны в качестве сырья для кормопроизводства и хлебопечения и не уступают по урожайности ранее районированным (хлебопекарным) сортам. Хлебопекарные свойства новых сортов не выходят за пределы аналогичных показателей у хлебопекарной ржи. Использование низкопентозановых сортов в рационах животных снимает проблему, существующую в случае кормления зерном хлебопекарной ржи.

Ключевые слова: *Secale cereale*, водорастворимые арабиноксиланы, генотипическая изменчивость, структура оболочки зерна, создание сортов универсального использования

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Для цитирования: Солодухина О.В. Принципы селекции ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов в зерне. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):42-52. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-03

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и его месту работы.

© Солодухина О.В., 2024

Review article

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-o3

Principles of rye breeding for low content of water-soluble pentosans in grain

Olga V. Solodukhina

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Olga V. Solodukhina, osolodukhina@yandex.ru

Winter rye is the second cereal crop after wheat. Rye exceeds other cereals in terms of nutritional value due to the high content of lysine, methionine, valine, as well as the balance of other essential amino acids in its protein. The direct use of baking rye grain as an animal feed is limited by the presence of water-soluble pentosans (arabinoxylans) in it. Therefore, the creation of low-pentosan rye with highly nutritious grain is a very perspective direction in the grain feed cultivar breeding. Under the leadership and with direct participation of Vladimir D. Kobylansky, a technology for breeding multiple-use low-pentosan rye was worked out at the N.I. Vavilov VIR in 2004-2021. A relationship between the low pentosan content and grain coat thinness has been revealed. For the first time, an effective method of low-pentosan genotypes identification by selecting thin-coat grains has been developed. This method was used to study 562 accessions from the VIR collection represented by cultivar populations, weedy and wild rye. It has been established that the number of thin-coat grains in a sample varies from 12 to 70%, depending on the accession. Varieties with the highest frequencies of low-pentosan genotypes can be used as initial material for breeding. The dependence of low content of water-soluble pentosans in grains on the expression of recessive alleles of the gene/genes responsible for the manifestation of the trait has been revealed. To create grain feed cultivars, it is proposed to use the method of cumulative intrapopulation crosses and the method of pairwise cross-pollinations of the plants with indicator ears. As a result, new cultivar populations of low-pentosan rye for universal use have been created, namely 'Vavilovskaya', 'Bereginya', 'Podarok', 'Yantarnaya', 'Krasnoyarskaya Universalnaya', 'Novaya Era', and 'Arga'. These cultivars are characterized by a low, as in wheat, genetically determined content of pentosans. They have been evaluated in the main rye growing regions, tested as raw material for fodder production and bread baking, and found to match the previously released commercial (bread) cultivars in terms of yield. The baking properties of new cultivars do not exceed those of bread rye. The use of low-pentosan cultivars in animal diets eliminates the problem that exists when feeding them with bread rye grain. These cultivars have no analogs in the world; they are listed in the State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (2023).

Keywords: *Secale cereale*, water-soluble arabinoxylans, genotypic variability, grain coat structure, creation of cultivars for universal use

Acknowledgments: The research was performed within the framework of the State Assignment according to the Thematic Plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

For citation: Solodukhina O.V. Principles of rye breeding for low content of water-soluble pentosans in grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):42-52. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-o3

Financial transparency. The author has no financial interest in the presented materials or methods. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author, and her employer.

© Solodukhina O.V., 2024

Введение

Рожь посевная *Secale cereale* L. как зерновая культура широко возделывается в условиях умеренного климата в России, Белоруссии, Польше, Германии, Украине, в Китае и странах Ближнего Востока. Посевная рожь – 14-ти хромосомный диплоидный вид, является ветроопыляемой культурой и представлена самонесовместимыми формами озимого и ярового типа развития.

Широкое распространение приобретает искусственно полученная автотетраплоидная форма с удвоенным числом хромосом ($2n=28$), которая распространена в основном в России и Белоруссии. Диплоидная и тетраплоидная формы не скрещиваются или слабо (0,3–0,5%) скрещиваются между собой, в результате чего дают потомство с ограниченной плодовитостью.

В зерне ржи содержится 9–18,5% белка, который по питательной ценности превосходит таковой пшеницы и ячменя за счет сбалансированности и более высокого содержания незаменимых аминокислот – лизина, метионина, валина, и соответствует белку коровьего молока на 83%, тогда как протеин пшеницы – лишь на 41% (Kobylyansky, 1982). В отличие от других зерновых культур, рожь содержит большое количество пентозанов. Разные формы пентозанов выполняют жизненно важные функции, обеспечивая жизнеспособность растений: рибоза участвует в обменных процессах и при формировании ДНК и РНК, ответственных за наследственность и изменчивость; арабиноза и ксилоза (арабиноксиланы) обеспечивают образование склеренхимных тканей растений и проводящих тканей корней, стеблей и плодов. К примеру, арабиноксиланы входят в состав гемицеллюлозы и, наряду с лигнином, целлюлозой и минеральными веществами, являются компонентами структуры клеточных стенок тканей растений и зерна (Kobylyansky, Solodukhina, 2013). Водорастворимых пентозанов (пятиуглеродных полимеров), представленных арабинозой и ксилозой (БАК), в зерне ржи в 3–4 раза больше, чем в пшенице. Это создает проблему при прямом использовании высокопитательного ржаного зерна на кормовые цели.

Будучи полимерами с высокой молекулярной массой, БАК обладают высокой гидрофильностью – способностью поглощать воды в 8–10 раз больше своей массы, поэтому при скармливании зерна ржи животным в их желудке образуется липкая слизь, обволакивающая пищевой ком. За счет того, что сельскохозяйственные животные (особенно с однокамерным желудком) не имеют ферментов для расщепления пентозанов, а последние не гидролизуются дрожжами, нарушается процесс пищеварения (Cyran et al., 1995; Boros, 2007). В результате затрудняется доступ пищеварительных ферментов к питательным веществам зерна, ограничиваются всасывание и усвоение продуктов пищеварения. В связи с этим, в комбикормовой промышленности России использование цельного зерна хлебопекарной ржи в рационах животных составля-

ет всего 8–12% от его валового сбора (Winter gye, 2007). Чаще всего ржаное зерно используют в виде смесей с другими зерновыми культурами. Частичное решение этой проблемы достигнуто за счет применения различных технологий: механическая, термическая обработки зерна, обработка электромагнитным полем, введение в рационы животных ферментов, гидролизующих пентозаны, и другие приемы (Volynkina, 2011; Sitnikov et al., 2013; Ismagilov et al., 2023a; 2023b). Использование таких технологий приводит к удорожанию кормов и продуктов животноводства, и, как следствие, к снижению востребованности высокопитательного зерна ржи в кормопроизводстве.

Проблема использования зерна ржи в качестве корма давно привлекала внимание исследователей в нашей стране и за ее пределами. Селекционное решение проблемы кормового качества сортов значительно отстает от решения задач хлебопекарной промышленности. Считается, что содержание пентозанов в большой мере зависит от вида, сорта и генотипа растений (Jurgens et al., 2012; Ponomareva, Ponomarev, 2019). Существует мнение, что задачи селекции ржи на хлебопекарную и зернофуражную пригодность не совпадают, и их следует решать в рамках независимых селекционных программ. Для создания хлебопекарных сортов необходима селекция на высокое содержание БАК, для производства кормов – на низкое их содержание (Flamme et al., 1996; Ismagilov et al., 2006; Goncharenko et al., 2007; 2015).

В Башкирском государственном аграрном университете и в Татарском научно-исследовательском институте сельского хозяйства изучают сортовые различия качества зерна ржи, его кормовую и хлебопекарную пригодность. В этой связи сорта 'Огонек', 'Радонь', 'Безенчукская 87', 'Саратовская 6', 'Антарес', 'Марусенька' и 'Чулпан 7' могут быть использованы в селекции кормовых сортов (Ismagilov, Gaysina, 2015; Ponomareva et al., 2015; 2017). Согласно проведенным исследованиям, наиболее высокое содержание БАК отмечено в зерне сорта 'Ирина' (3,50–4,3%), а наименьшее – в зерне 'Саратовской 7' (2,12%) (Ismagilov, Akhiyarova, 2012).

В последнее время показана возможность использования маркер-ориентированной селекции при создании сортов ржи с низкой вязкостью зернового шрота, обусловленной пониженным содержанием водорастворимых пентозанов (Zaikina et al., 2023). В связи с этим, создание низкопентозановой ржи с высокопитательным зерном, сочетающей требования кормовой и хлебопекарной ржи – чрезвычайно перспективное направление в селекции новых сортов.

Основные изложенные в данной статье принципы работы по созданию низкопентозановой универсальной ржи разработаны во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) и апробированы в различных селекционных центрах Российской Федерации: Татарском НИИСХ, ФГУП «Котласское», Псковском НИИСХ, Уральском НИИСХ, Красно-

Методы идентификации генотипов растений с низким содержанием водорастворимых пентозанов в зерне

Первоначально с целью поиска исходного материала для селекции низкопентозановых сортов ржи зарубежными исследователями был апробирован метод, основанный на определении показателя вязкости водного экстракта зерна (ВВЭ). Например, польскими учеными (Boros et al., 1993; Boros, 2007) обнаружена связь между содержанием водорастворимых арабиноксиланов и ВВЭ у озимой и яровой ржи, тритикале и пшеницы. В результате была определена возможность использования степени ВВЭ как важного показателя при определении кормовых и хлебопекарных качеств зерна ржи. Другие авторы экспериментально подтвердили надежность такого подхода (Goncharenko et al., 2007; Jurgens et al., 2012; Ibragimova, Kuluev, 2020).

Есть мнение, что, хотя ВВЭ и коррелирует с содержанием ВАК, окончательный вывод целесообразно делать лишь по результатам многолетних наблюдений в контрастных условиях произрастания ржи (Goncharenko et al., 2007). Так, в результате целенаправленного дивергентного отбора по уровню ВВЭ в течение 10 лет из популяционных сортов ржи 'Альфа' и 'Московская 12' были получены субпопуляции, имеющие контрастную ВВЭ по каждому сорту. Исследования показали, что у низкопентозановых аналогов ухудшались хлебопекарные качества, наблюдалась тенденция к снижению урожая зерна за счет уменьшения массы 1000 зерен и натуры зерна (Goncharenko et al., 2016; 2017). К сожалению, использование показателя низкой ВВЭ в селекции не привело к созданию низкопентозановых популяционных сортов.

В других экспериментах при изучении инбредных линий был выделен материал с контрастными показателями ВВЭ, пригодный для целевой селекции гибридных сортов ржи (Madej et al., 1990; Boros et al., 1997; Kolasinska et al., 2003; Cyran et al., 2012). Примером успешной селекции на низкое содержание водорастворимых пентозанов в зерне является сорт гибридной ржи 'КВС Авиатор', имеющий низкие значения ВВЭ (Zaikina et al., 2023).

Использование методов биохимического анализа зерна для определения ВАК в зерне ржи не всегда подходит для исследования популяционных сортов. Ввиду того, что популяционный сорт объединяет в себе генотипы растений, различающихся по содержанию в зерне водорастворимой фракции пентозанов, биохимический показатель качества будет меняться в зависимости от состава исследуемой выборки, то есть от соотношения растений и, соответственно, зерновок, имеющих альтернативное содержание ВАК. Кроме того, при использовании различных методов биохимического анализа для определения качества и количества пентозанов в зерне, не всегда удается получить однозначные сопоставимые результаты

(Gilmullina et al., 2021; Zaikina et al., 2023). Невозможно использовать биохимический метод для оценки небольшого количества зёрен, которыми располагает селекционер, так как в процессе исследования нарушается целостность зерновок и тем самым разрушается объект селекции.

Исключениями являются изучение самоопылённых линий, используемых для селекции гибридных сортов ржи, и оценка клонов при клоновой селекции растений. В этом случае, изолированная часть каждого клона или линии в каждом отдельном случае представляет собой генетически однородный по изучаемому признаку материал.

Фактором, ограничивающим широкое использование биохимических методов для анализа зерна у большого количества образцов, является их дороговизна, и длительность их проведения.

Учитывая вышеизложенное, мы в своих исследованиях используем другую возможность идентификации низкопентозановых генотипов среди популяционных сортов озимой ржи. Используя факт, что у зерновых культур пентозаны локализируются преимущественно в покровах зерновок (перикарпии), семенной кожуре (спермодерме) и алейроновом слое (Kretovich, Petrova, 1951; Dimenshtein et al., 1958), нами были проведены исследования, направленные на изучение анатомо-морфологической структуры зерновок ржи, различающихся по содержанию ВАК. Удалось показать тесную связь между толщиной оболочек зерновок ржи и содержанием в них водорастворимых пентозанов: чем тоньше покровы зерновки, тем меньше в ней ВАК. В данном случае тонкопоровность или ложная стекловидность зерна является генетическим маркером низкого (0,3–0,9%) содержания водорастворимых пентозанов. Замечено, что значительное уменьшение толщины оболочек с 102 до 60,5 мкм достоверно сопровождалось снижением содержания ВАК в зерне с 2,2 до 0,5–0,9% (Kobylyansky et al., 2021). Низкое содержание ВАК у тонкопоровных зерновок обусловлено меньшим по объему местом их локализации в оболочках, в межклеточном пространстве и алейроновом слое. Тонкопоровность низкопентозановых зерновок диагностируется через ложную стекловидность, то есть прозрачность зерновки при мучнистом эндосперме. Использование такого маркера позволяет исключить применение биохимических методов при идентификации низкопентозановых зерновок. Все это явилось основой нашей разработки экспресс-метода, позволяющего идентифицировать и отбирать низкопентозановые зерна ржи, не нарушая целостности зерновки (Kobylyansky, Solodukhina, 2013).

В отличие от других хлебных злаков, все сорта культурной ржи и ее дикорастущие родичи характеризуются внутривидовым диморфизмом, проявляющимся в существовании двух фракций зерна, различающихся по толщине покровов. Например, зерно толстопоровной фракции имеет толстую грубую морщинистую оболочку, а тонкопоровной – гладкую полупрозрачную, которая

почти в два раза тоньше, чем у первой фракции.

Обследование 562 образцов коллекции сортовой, сорно-полевой и дикорастущей (ломкой) ржи показало, что количество тонкопокровных (низкопентозановых) зерен, в зависимости от образца, варьирует от 12% до 70% (Kobylyansky et al., 2021). Тонкопокровные (низкопентозановые) зерновки можно обнаружить при их просвечивании лучами белого цвета. На просвет они выглядят подобными стекловидным.

По результатам биохимического анализа установлено, что зерновки ржи, подобные стекловидным, характеризуются низким (0,3–0,9%) содержанием ВАК. Следовательно, отбирая тонкопокровные зерновки, мы отбираем генотипы ржи, определяющие низкое содержание пентозанов в зерне, что соответствует цели создания низкопентозановых сортов. Согласно этому, тонкопокровность и ложная стекловидность являются маркерами низкого содержания ВАК в зерне.

К сожалению, рожь остается одной из самых малоизученных в генетическом отношении зерновой культурой. В литературе на данный момент имеется мало информации о генах, влияющих на содержание пентозанов в зерне

ржи (Kozlova et al., 2022). Изучение ржи, пшеницы и трикале позволило некоторым исследователям (Boros et al., 2002) утверждать, что гены, контролирующие содержание пентозанов, распределены по всем хромосомам, и их много, что исключает возможность манипулировать ими в процессе селекции.

У растений в биосинтез арабиноксиланов вовлечены гены, обуславливающие синтез ферментов гликозилтрансфераз, которые секвенированы у мягкой пшеницы, ячменя и некоторых других злаковых. В связи с тем, что *S. cereale* является близким родственником пшеницы, при поиске генов гликозилтрансфераз ржи можно ожидать присутствия в её геноме нуклеотидных последовательностей, сходных с таковыми мягкой пшеницы (Delcour et al., 1989; 1991). Содержание арабиноксилановой фракции пентозанов в зерне ржи зависит не только от функционирования ферментов их биосинтеза, но и от комплекса ферментов их деградации – ксиланаз (Ibragimova, Kuluev, 2020).

Экспериментами установлена зависимость низкого содержания ВАК в зерне от экспрессии рецессивных аллелей гена/генов, ответственных за присутствие водорастворимых пентозанов (табл. 1).

Таблица 1. Взаимодействие аллелей генов, контролирующих водорастворимые арабиноксиланы (ВАК) в зерне озимой ржи
(по В.Д. Кобылянский, О.В. Солодوخина, 2009)

Table 1. Interaction of alleles of genes controlling water-soluble arabinoxylans (WS-AX) in winter rye grain
(according to V.D. Kobylyansky, O.V. Solodukhina, 2009)

| Комбинация скрещивания (сорта и линии)/ Crossing combination (cultivars and lines) | Содержание ВАК в зерне, % (в расчете на сухое вещество)/ WS-AX content in grain, % (in terms of dry matter) | | | Степень доминирования высокого содержания ВАК, S (ha)/ Degree of dominance of high WS-AX content, S (ha) |
|---|---|----------------|------|---|
| | ♀ | F ₁ | ♂ | |
| Коминакс штамм 37/08 г | 1,20 | 2,07 | 2,08 | 0,99 |
| Минакс штамм 2/05 г | 1,15 | 2,08 | 2,08 | 0,99 |
| Эра Л 32/06 г | 1,32 | 2,03 | 2,01 | 1,00 |
| Иммунная 762 г | 1,43 | 2,17 | 2,08 | 0,97 |
| Волхова 2 г | 1,43 | 2,01 | 2,00 | 1,03 |
| Эра Л 74/06 г | 1,20 | 2,09 | 2,08 | 1,03 |
| Минакс штамм 173/06 г | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 0,00 |
| Коминакс штамм 37/08 г | 1,20 | 1,20 | 1,15 | 0,01 |

Согласно результатам реципрокных скрещиваний, влияние отцовских компонентов скрещивания на качество (содержание ВАК) гибридных семян материнских растений не замечено, то есть мужской гаметофит не оказывает влияния на степень проявления признака (табл. 2). Имеющаяся информация позволила предложить новый подход к созданию исходного материала для селекции низкопентозановых сортов ржи (Kobylyansky, Solodukhina, 2023). Особенность и оригинальность предложенной технологии состоит в том, что для отбора

используют не все зерновки исходной популяции сорта ржи, а только ту её фракцию, которая характеризуется тонкими покровами. В качестве исходного материала целесообразно брать лучшие или перспективные сорта ржи, адаптированные к тем почвенно-климатическим условиям выращивания растений, для которых создается новый сорт. Наиболее эффективным исходным материалом, ускоряющим селекцию зернофуражной ржи, могут служить низкопентозановые сорта, которые уже созданы для разных экологических зон РФ.

Таблица 2. Содержание водорастворимых арабиноксиланов в гибридных зерновках ржи, полученных в результате реципрокных скрещиваний

(Санкт-Петербург, Пушкин) (по В.Д. Кобылянский, О.В. Солодухина, 2009)

Table 2. Content of water-soluble arabinoxylans in grain of hybrid rye from reciprocal crosses

(St. Petersburg, Pushkin) (according to V.D. Kobylyansky, O.V. Solodukhina, 2009)

| Компоненты скрещивания/ Components for crossing | Содержание БАК в зерне, %/ WS-AX content in grain, % | Реципрокные гибриды/ Reciprocal hybrids | Содержание БАК в гибридном зерне, %/ WS-AX content in hybrid grain, % |
|--|--|---|---|
| Клон 289/07 | 2,00 | Клон 289/07 г | 2,00 |
| Клон 246/07 | 0,53 | Клон 246/07 г | 0,54 |
| Клон 74/07 | 1,20 | Клон 74/07 г | 1,20 |
| Сорт 'Дымка' | 2,08 | Сорт 'Дымка' г | 2,08 |

Элитное зерно этих сортов можно использовать в контролируемых скрещиваниях в качестве материнских компонентов или как исходный материал для отбора лучших генотипов, выявившихся при выращивании в зоне селекции. Для расширения генофонда ржи в ВИР созданы доноры, сочетающие низкое содержание БАК в зерне с высокими показателями важных агрономических и других ценных для селекции признаков растений (Kobylyanskii, Solodukhina, 2015).

Охарактеризуем основные методы, которые были использованы в ВИР при селекции форм ржи, характеризующихся низким уровнем содержания водорастворимых пентозанов в зерне без использования методов биохимического анализа.

Метод накопительных внутрипопуляционных скрещиваний

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

Нужно учитывать, что все сорта ржи состоят из двух фракций растений, имеющих тонкопокровное и толстопокровное зерно. При размножении растения сорта произвольно скрещиваются внутри популяции ржи под изоляционной кабиной или на изолированном участке. В результате одна часть растений с тонкопокровным зерном, полученным от скрещивания с аналогичными растениями, формируют тонкопокровное зерно. При посеве из такого гибрида вырастает низкопентозановое тонкопокровное потомство. Другая часть растений с тонкопокровным зерном при скрещивании с растениями, имеющими зерно с толстыми оболочками, в результате отсутствия влияния мужского гаметофита на проявление признака, формируют зерно, имеющее гибридный

зародыш, но тонкопокровный перикарпий, сформированный из материнских клеток. В результате при посеве такого зерна вырастает высокопентозановая рожь с толстопокровными зернами. Схематично процесс накопления зерен с тонкими оболочками при внутрипопуляционных скрещиваниях показан на рисунке 1.

Этот метод, используемый на начальных этапах селекции, предусматривает систематический отбор (в течение 1-6 поколений) ложностекловидных зерен, их посев и размножение под изолятором в условиях, исключающих нежелательное опыление. Такие внутрипопуляционные скрещивания приводят к накоплению в потомствах числа зерен с признаком тонкопокровности и увеличению доли однородных тонкопокровных и уменьшению доли гетерогенных потомств в создаваемых низкопентозановых популяциях. В зависимости от первоначальной частоты нужных зерен в исходной популяции и качества отбора, при достижении 40–50% низкопентозановых зерновок в новой популяции частота тонкопокровных форм, однородных по признаку низкого содержания БАК, будет составлять примерно 20%.

В течение всего периода накопительных скрещиваний растений из посева необходимо удалять растения, не отвечающие требованиям селекции по другим признакам.

После завершения внутрипопуляционных накопительных скрещиваний, отобранные по фенотипу тонкопокровные зерновки будут не одинаковы по генотипу (гомозиготные или гетерозиготные) и давать уже в первом поколении однородное нерасщепляющееся потомство с тонкопокровным зерном, или гетерогенное потомство, расщепляющееся на растения с тонко- и толстопокровным зерном. После завершения внутрипопуляционных накопительных скрещиваний необходимо в питомнике попарного переопыления провести отбор растений, дающих в потомстве только однородные (нерасщепляющиеся) популяции, характеризующиеся тонкопокровными зерновками.

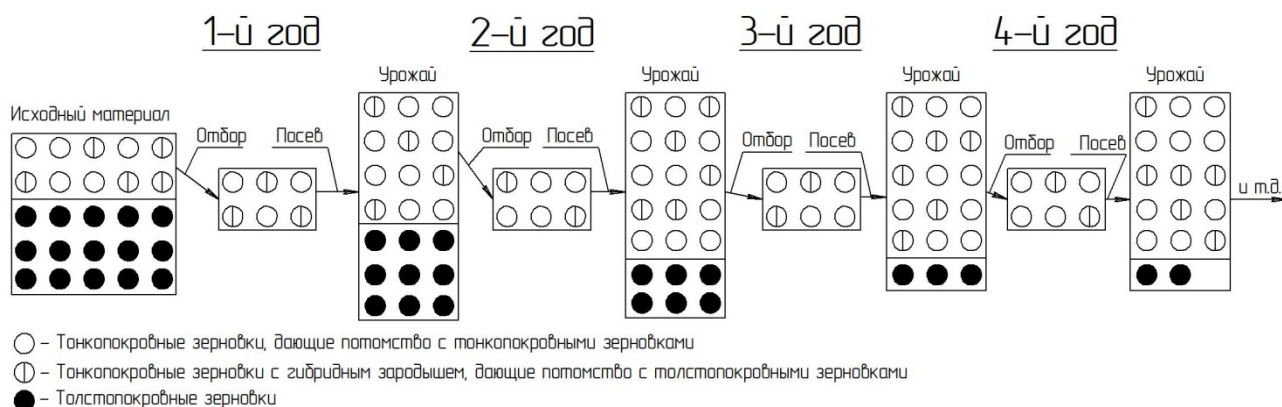


Рис. 1. Схема внутрипопуляционных накопительных скрещиваний растений ржи для увеличения доли тонкопокровных зерен в популяции сорта
(по В.Д. Кобылянский, О.В. Солодухина, 2023)

Fig. 1. Scheme of accumulative intrapopulation crosses of rye plants to increase the proportion of thin-coat grains in a cultivar population
(according to V.D. Kobylyansky, O.V. Solodukhina, 2023)

Метод парного переопыления растений с индикаторными колосьями

Метод был предложен и апробирован еще в 1972 году для отбора в гибридных потомствах растений, гомозиготных по гену *H1*, контролирующему доминантную короткостебельность ржи (Kobylyansky, 1982). Позднее этот ген, названный *Ddw1* (от *Dominant dwarfness*), был локализован в длинном плече 5R хромосомы ржи (Korzun et al., 1996).

Применение парных скрещиваний с индикаторными колосьями позволяет отбирать растения, гомогенные по признаку тонкопокровности, имеющие низкое содержание ВАК в зерне. Для посева используют популяцию, в которой после многократных внутрипопуляционных накопительных скрещиваний количество тонкопокровных зерен составляет не менее 40–50%. Экспериментальным путем установлено, что для создания полноценной по генетической структуре перекрестно опыляющейся популяции необходимо получить не менее 500 пар, состоящих только из низкопентозановых растений. Для этого нужно посеять 1400–1500 тонкопокровных зерен, что позволит получить на выходе только 10–13% гомогенных пар, нерасщепляющихся по признаку тонкопокровности. Расчетное число семян для посева в опыте по созданию одной популяции выбрано с учетом всхожести, перезимовки, а также браковки нетипичных всходов. Схема закладки питомника парных скрещиваний представлена на рисунке 2.

Такая форма размещения посева удобна для проведения попарной изоляции большого числа растений и ух-

да за посевом. Пары формируют в период колошения ржи с использованием близко стоящих друг к другу растений, подходящих по габитусу и количеству стеблей. Под общий пергаментный изолятор помещают часть колосьев от каждого растения пары таким образом, чтобы по два колоса каждого растения оставались вне изолятора для свободного опыления. С целью создания пыльцевого режима для опыления контрольных колосьев, находящихся вне изоляторов, посев необходимо размещать в селекционном питомнике для парных переопылений. После уборки и оценки завязавшихся семян по толщине покровов у контрольных колосьев оставляют для посева только те пары, у которых оба растения имели тонкопокровные зерновки.

В период первого года размножения семян отобранных пар до цветения удаляют нежелательные по агрономическим признакам растения. Впоследствии новую популяцию предсорта изучают по всем признакам, предусмотренным требованиями Госкомиссии РФ.

Таким образом, с использованием малозатратных технологий совместно с селекционными учреждениями страны за период 2016–2023 годов созданы и внесены в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений РФ (State Register, 2023; табл. 3) первые популяционные сорта озимой ржи, характеризующиеся низким содержанием водорастворимых арабиноксиланов в зерне и высокими агрономическими признаками: 'Вавиловская' (к-11819), 'Берегиня' (к-118220), 'Подарок' (к-11816), 'Янтарная' (к-11804), 'Красноярская университетская' (к-11818), 'Новая Эра' (к-11814) и 'Арга' (к-11907) (см. табл. 3).

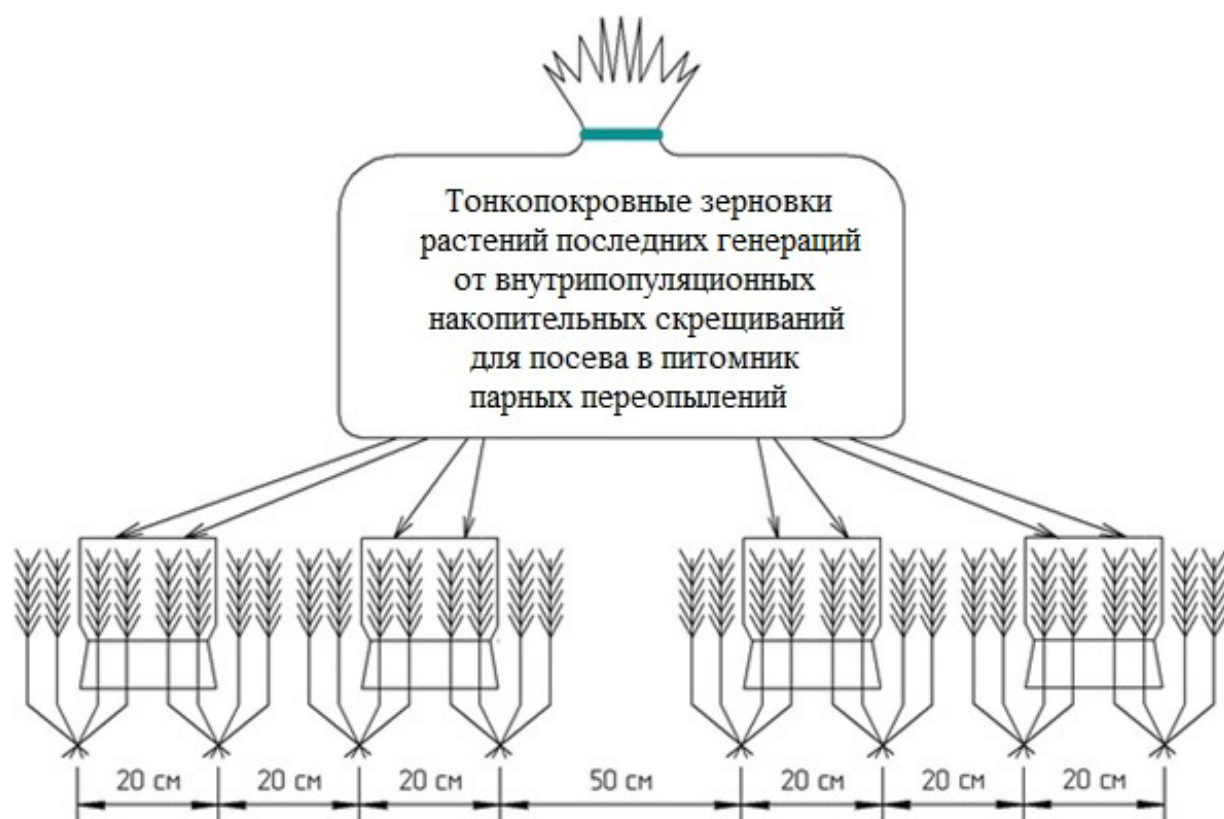


Рис. 2. Схема размещения растений в двухленточном посеве для парной изоляции
(по В.Д. Кобылянский, О.В. Солодухина, 2023)

Fig. 2. Scheme of plant placement in double-band sowing for paired isolation
(according to V.D. Kobylyansky, O.V. Solodukhina, 2023)

Таблица 3. Характеристика низкопентозановых сортов озимой ржи

(по результатам Государственной комиссии Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений)

Table 3. Characteristics of low-pentosan winter rye cultivars

(according to the results of the State Commission of the Russian Federation for Testing and Protection of Selection Achievements)

| Сорт/ Cultivar | Включение в Госреестр РФ/ Inclusion in State Register of the Russian Federation | | Содержание водорастворимых пентозанов в зерне, %/ Content of water-soluble pentosans in grain, % | Урожайность, ц/га/ Yield, hwt/ha | | Масса 1000 зерен, г/ 1000 grains weight, g |
|---------------------------------|---|----------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------|---|
| | год/ year | регион/ region | | Средняя/ average | макси- мальная/ maximum | |
| ‘Берегиня’ | 2016 | Северный | 0,4–0,5 | 25,7 | 42,7 | 25–36 |
| ‘Подарок’ | 2016 | Волго-Вятский, Средневолжский | 0,7–1, 6 | 32,5 | 64,7 | 24–35 |
| ‘Вавиловская’ | 2016 | Центральный | 0,5–0,6 | 40,9 | 72,5 | 29–38 |
| ‘Янтарная’ | 2018 | Волго-Вятский | 0,53 | 26,5 | 63,0 | 28–37 |
| ‘Красноярская универсальная’ | 2018 | Восточно-Сибирский | 0,5–0,8 | 26,7 | 58,2 | 24–25 |
| ‘Новая Эра’ | 2021 | Северо-Западный | 0,5–0,6 | 34,1 | 64,1 | 28–38 |
| ‘Арга’ | 2023 | Восточно-Сибирский | 0,5–0,8 | 24,3 | 72,2 | 21–29 |

Созданные сорта адаптированы для возделывания в восьми различных почвенно-климатических регионах России. По результатам Госсорткомиссии урожайность сортов не уступает рекомендуемым для каждой зоны стандартам, а в отдельных областях достигает 64–72 ц/га.

По качеству зерна низкопентозановые сорта-популяции не имеют мировых аналогов. Зерно такой ржи перестаёт быть плохо усваиваемым, что присуще сортам хлебопекарной ржи при использовании последних для кормления животных. Это открывает возможность для включения новых сортов в рацион кормов для животных без применения дорогих ферментных добавок и других способов обработки зерна. Корма на основе высокопитательного низкопентозанового зерна более охотно поедаются всеми видами сельскохозяйственных животных, легко перевариваются и усваиваются (Potapova et al., 2017). Экспериментально доказано, что в результате двухмесячного кормления поросят новым рационом, в котором зерновые культуры из стандартного рациона на 50% заменили зерном низкопентозановой ржи и при этом исключили дорогостоящие пищевые добавки (сухое молоко и премикс), получили увеличение прироста животных на 44,5% по сравнению с использованием стандартного рациона. При этом на 41,7% снизились затраты для получения привеса 1 кг поросят (Kobyliansky et al., 2017).

В Северо-Кавказском зональном научно-исследовательском ветеринарном институте получены экспериментальные данные, показывающие, что при кормлении поросят в течение месяца измельченным зерном низкопентозановой ржи прирост живой массы на одну голову был на 16% больше, чем при кормлении измельченной ячменно-пшеничной смесью (Kobyliansky et al., 2017).

Согласно проведенным исследованиям, мука низкопентозановой зернофуражной ржи по хлебопекарным свойствам не отличается от муки традиционных хлебопекарных сортов (Lavrenteva et al., 2016; Kobyliansky et al., 2018). Полученные данные подтверждают универсальность низкопентозановых сортов ржи при их использовании в зернофуражной, хлебопекарной и перерабатывающей промышленности.

References/Литература

- Boros D. Quality aspects of rye for feed purposes. *Vortrage fur Pflanzenzuchtung*. 2007;71:80-85.
- Boros D., Lukaszewski A.J., Aniol A., Ochodzki, P. Chromosome location of genes controlling the content of dietary fibre and arabinoxylans in rye. *Euphytica*. 2002;128:1-8. DOI: 10.1023/A:1020639601959
- Boros D., Madej L., Jagodzinski J. Perspectives of selection for better nutritive quality of rye. *Plant Breeding and Seed Science*. 1997;41(2):81-89.
- Boros D., Marquardt R.R., Slominski B.A., Guenter W. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosans content in rye. *Cereal Chemistry*. 1993;70(5):575-580. Available from: https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1993/Documents/70_575.pdf [accessed March 13, 2024].
- Cyran M.R., Ceglinska A., Kolasinska I. Depolymerization degree of water-extractable arabinoxylans in rye bread: characteristics of inbred lines used for breeding of bread cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60(35):8720-8730. DOI: 10.1021/jf301573v
- Cyran M., Rakowska M., Wasilewko J., Buraczewska L. Degradation of dietary fiber polysaccharides of rye in the intestinal tract of growing pigs used as a model animal for studying digestion in humans. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 1995;4(3):217-227. DOI: 10.22358/jafs/69795/1995
- 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 Chemistry*. 1989;66(2):107-111. Available from: https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66_107.pdf [accessed March 13, 2024].
- Delcour J.A., Vanhamel S., Hosney R.S. Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. II. Impact of a fraction containing water-soluble pentosans and proteins on gluten-starch loaf volumes. *Cereal Chemistry*. 1991;68(1):72-76. Available from: https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1991/Documents/68_72.pdf [accessed March 14, 2024].
- Dimenshtein F.I., Ermakov A.I., Knyaginichev M.I., Goncharenko F.I. Biochemistry of rye (Biohimiya rzhi). In: *Biochemistry of cultural plants (Biohimiya kul'turnyh rastenij)*. 2nd ed. Moscow; Leningrad; 1958. Vol. 1. p.165-233. [in Russian] (Дименштейн Ф.И., Ермаков А.И., Княгиничев М.И., Гончаренко Ф.И. Биохимия ржи. В кн.: *Биохимия культурных растений*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва; Ленинград; 1958. Т. 1. С.165-233).
- Flamme W., Dill P., Jansen G., Roux S. Developing rye germplasm for alternative use: Quality assessment methods and progress from selection. *Beiträge zur Züchtungsforschung*. 1996;35:129-138.
- Gilmullina L.F., Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S. Methods of quantitative and qualitative determination of arabinoxylans in cereals (review). *Khimija rastitel'nogo syr'ja = Chemistry of plant raw material*. 2021;(1):27-43. [in Russian] (Гильмуллина Л.Ф., Пономарева М.Л., Пономарев С.Н., Маннапова Г.С. Методы качественного и количественного определения арабиноксиланов в зерне злаков (обзор). *Химия растительного сырья*. 2021;(1):27-43). DOI: 10.14258/jcrpm.2021017713
- Goncharenko A.A., Ermakov S.A., Makarov A.V., Semenova T.V., Tochilin V.N., Osipova A.V., Lazareva E.N., Krahmaleva O.V. Winter rye breeding on high and low water extract viscosity. *Grain Economy Russia* 2015;(4):21-27. [in Russian] (Гончаренко А.А., Ермаков С.А., Макаров А.В., Семенова Т.В., Точили В.Н., Осипова А.В., Лазарева Е.Н., Крахмалева О.А. Селекция озимой ржи на высокую и низкую вязкость водного экстракта. *Зерновое хозяйство России*. 2015;(4):21-27).
- Goncharenko A.A., Ermakov S.A., Makarov A.V., Semenova T.V., Tochilin V.N., Osipova A.V., Lazareva E.N., Krahmaleva O.A., Jashina N.A. Multiple divergent selection on viscosity of water extract of winter rye. *Russian agricultural sciences*. 2016;42(5):289-294. DOI: 10.3103/S1068367416050074
- Goncharenko A.A., Osipova A.V., Jashina N.A., Kondratieva O.P., Scherbakova Z.N. Evaluation of quality attributes of winter rye grain with different extract viscosity (Otsenka priznakov kachestva zerna ozimoy rzhi s razlichnoy vyzkost'yu vodnogo ekstrakta). *Khleboпродукты = Bakery products*. 2017;(11):54-57 [in Russian] (Гончаренко А.А., Осипова А.В., Яшина Н.А., Кондратьева О.П., Щербакова З.Н. Оценка признаков качества зерна озимой ржи с различной вязкостью водного экстракта. *Хлебопродукты*. 2017;(11):54-57).
- Goncharenko A.A., Timoshenko A.S., Berkutova N.S. Viscosity of grain water extract in winter rye as universal parameter during breeding on principal use. *Agricultural Biology*. 2007;42(3):44-49. [in Russian] (Гончаренко А.А., Тимошенко А.С., Беркутова Н.С. Вязкость водного экстракта зерна озимой ржи как универсальный признак при селекции на целевое использование. *Сельскохозяйственная биология*.

- 2007;42(3):44-49).
- Ibragimova Z.A., Kuluev B.R. Molecular basis of food and feed qualities of rye (*Secale cereale*) grain. *Biomics*. 2020;12(1):8-26. [in Russian] (Ибрагимова З.А., Кулуев Б.Р. Молекулярные основы пищевых и кормовых качеств зерна ржи (*Secale cereale*). *Биомика*. 2020;12(1):8-26). DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2020-2
- Ismagilov R.R., Akhiyarova L.M. Fodder qualities of winter rye grain (Kormovye kachestva zerna ozimoy rzhi). Ufa: Gilem; 2012. [in Russian] (Исмагилов Р.Р. Ахиярова Л.М. Кормовые качества зерна озимой ржи Уфа: Гилем; 2012).
- Ismagilov R.R., Gaysina L.F. The baking qualities of grain hybrids of winter rye. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(1):24-26. [in Russian] (Исмагилов Р.Р., Гайсина Л.Ф. Хлебопекарные качества зерна гибридов F₁ озимой ржи. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(1):24-26).
- Ismagilov R.R., Alimgafarov R.R., Savina A.A. The use enzyme preparations is an effective method for reducing pentosans in winter rye grain. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2023a;37(1):46-50. [in Russian] (Исмагилов Р.Р., Алимгафаров Р.Р., Савина А.А. Применение ферментных препаратов – эффективный приём снижения содержания пентозанов в зерне озимой ржи. *Достижения науки и техники АПК*. 2023a;37(1):46-50). DOI: 10.53859/02352451_2023_37_1_46
- Ismagilov R.R., Maljutina K.V., Alimgafarov R.R., Kayumova R.R. Prospects for the use and methods of reducing arabinoxylans of winter rye feed grain. *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*. 2023b;1(65):26-32. [in Russian] (Исмагилов Р.Р., Малютина К.В., Алимгафаров Р.Р., Каюмова Р.Р. Перспективы использования и приемы снижения арабиноксиланов кормового зерна. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2023b;1(65):26-32). DOI: 10.31563/1684-7628-2023-65-1-26-32
- Ismagilov R.R., Vanushina T.N., Ayupov D.S. Rye pentosans (Pentozany rzhy). R.R. Ismagilov (ed.). Ufa: Bashkir State Agrarian University; 2006. [in Russian] (Исмагилов Р.Р., Ванюшина Т.Н., Аюпов Д.С. Пентозаны ржи / под ред. Р.Р. Исмагилова. Уфа: Башкирский ГАУ; 2006).
- Jürgens H.-U., Jansen G., Wegener C.B. Characterization of several rye cultivars with respect to arabinoxylans and extract viscosity. *Journal of Agricultural Science*. 2012;4(5):1-12. DOI: 10.5539/jas.v4n5p1
- Kobylyanskii V.D., Solodukhina O.V. Use of donors of valuable traits of plants in breeding of new varieties of winter rye. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):7-12. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Использование доноров ценных признаков растений в селекции новых сортов озимой ржи. *Достижение науки и техники АПК*. 2015;29(7):7-12).
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V., Lunegova I.V., Novikova S.P., Hlopyuk M.S., Makarov V.I. 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: DOI: 10.30901/2227-8834-2017-1-31-40
- Kobylyansky V.D. Rye. Genetic bases of breeding (Rozh'. Geneticheskiye osnovy selektsii). Moscow: Kolos; 1982. [in Russian] (Кобылянский В.Д. Рожь. Генетические основы селекции. Москва: Колос; 1982).
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V. Basis of low pentozan rye breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and 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).
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V. Theoretical basis of grain fodder rye breeding for low water soluble pentosans. *Agricultural Biology*. 2013;48(2):31-39. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Теоретические основы селекции зернофуражной ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов. *Сельскохозяйственная биология*. 2013;48(2):31-39).
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V. Breeding and seed production technology for the rye of universal use with low content of water-soluble pentosans in grain. I.G. Lockutov (ed). St. Petersburg: VIR; 2023. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В.; под научной редакцией И.Г. Лоскутова. Технология селекции и семеноводства ржи универсального использования с низким содержанием водорастворимых пентозанов в зерне. Санкт-Петербург: ВИР; 2023). DOI: 10.30901/978-5-907145-57-3
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V., Kuznetsova L.I., Lavrenteva N.S., Timina M.A. Prospects of low pentosane grain fodder rye use for baking purposes. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka = Russian Agricultural Science*. 2018;(6):3-5. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В., Кузнецова Л.И., Лаврентьева Н.С., Тимина М.А. Перспективы использования низкопентозановой ржи для хлебопекарных целей. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018;(6):3-5). DOI: 10.31857/S250026270001823-0
- 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. [in Russian] (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
- Kolasińska I., Boros D., Madej L., Cygankiewicz A. Quantitative characteristic of rye inbred lines. *Plant Breeding and Seed Science*. 2003;48(2-2):127-131. Available from: https://www.researchgate.net/publication/308723143_QUALITATIVE_CHARACTERISTICS_OF_RYE_INBRED_LINES [accessed March 14, 2024].
- Korzun V., Börner A., Melz G. RFLP mapping of the dwarfing (*Ddw1*) and hairy peduncle (*Hp*) genes on chromosome 5 of rye (*Secale cereale* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 1996;92(8):1073-1077. DOI: 10.1007/BF00224051
- Kozlova L.V., Nazipova A.R., Gorshkov O.V., Gilmullina L.F., Sautkina O.V., Petrova N.V. Identification of genes involved in the formation of soluble dietary fiber in winter rye grain and their expression in cultivars with different viscosities of wholemeal water extract. *The Crop Journal*. 2022;10(2):532-549. DOI: 10.1016/j.cj.2021.05.008
- Kretovich V.L., Petrova I.S. Rye grain mucus and its technological significance. (Slizi rzhanogo zerna i ikh tekhnologicheskoe 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).
- Lavrenteva N.S., Kuznetsova L.I., Kobylyansky V.D., Zhirnova E.V. Baking properties of the rye flour with a low content of water-soluble pentosans. *Bakery of Russia*. 2016;6:32-34. [in Russian] (Лаврентьева Н.С., Кузнецова Л.И., Кобылянский В.Д., Жирнова Е.В. Хлебопекарные свойства муки из зерна ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов. *Хлебопечение России*. 2016;6:32-34).
- Madej L., Raczynska-Bojanowska K., Rybka K. Variability of the content of soluble noningestible polysaccharides in rye inbred lines. *Plant Breeding*. 1990;104:334-339. DOI: 10.1111/j.1439-0523.1990.tb00444.x
- Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Optimization of grain quality parameters for winter rye breeding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):320-327. [in Russian] (Пономарева М.Л., 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
- Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Gilmullina L.F., Mannapova G.S. Phenotypic assessment of the content of pentosans in rye meal by the method of determining the viscosity of an aqueous extract. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(11):32-35. [in Russian] (Пономарева М.Л., Пономарев С.Н.,

- Гильмуллина Л.Ф., Маннапова Г.С. Фенотипическая оценка содержания пентозанов в ржаном шроте методом определения вязкости водного экстракта. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(11):32-35).
- Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Tagirov M.Sh., Gilmullina L.F., Mannapova G.S. Pentosan content genotypic variability in winter rye grain. *Agricultural biology*. 2017;52(5):1041-1048. [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. *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(5):1041-1048). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.5.1041eng
- Potapova G.V., Tkachenko I.V., Galimov K.A. New grain fodder cultivar of winter rye Yantarnaya (Novyi zernofurazhnyi sort ozimoy rzhi Yantarnaya). *Teoriya i praktika mirovoy nauki = Theory and practice of world science*. 2017;10:66-69. [in Russian] (Потапова Г.В., Ткаченко И.В., Галимов К.А. Новый зернофуражный сорт озимой ржи Яantarная. *Теория и практика мировой науки*. 2017;10: 66-69).
- Sitnikov V.A., Popov A.N., Morozkov N.A., Nikolaev S.U. Changes in the composition of rye grain as a result of moisture-thermal treatments (Izmeneniya sostava zerna rzhi v rezultate vlagoteplovyykh obrabotok). *Perm Agrarian Journal*. 2013;2(2):43-45. [in Russian] (Ситников В.А., Попов А.Н., Морозков Н.А., Николаев С.Ю. Изменения состава зерна ржи в результате влаготепловых обработок. *Пермский аграрный вестник*. 2013;2(2):43-45).
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow: Ministry of Agriculture of Russia; Federal State Budgetary Institution "Gossortkomissiya"; 2023. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1 «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Министерство сельского хозяйства России; ФГБНУ «Госсорткомиссия»; 2023).
- Zaikina E.A., Kayumova R.R., Kuluev A.R., Ismagilov R.R., Kuluev B.R. Analysis of nucleotide sequences of the GT47 glycosyltransferase gene in rye cultivars differing in the content of water-soluble pentosans in grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(2):112-119. [in Russian] (Заикина Е.А., Каюмова Р.Р., Кулуев А.Р., Исмагилов Р.Р., Кулуев Б.Р. Анализ нуклеотидных последовательностей гена гликозилтрансферазы GT47 у сортов ржи, различающихся по содержанию водорастворимых пентозанов в зерне. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(2):112-119). DOI:10.30901/2227-8834-2023-2-112-119
- Volynkina M. The effectiveness of the use of enzyme preparations in the diets of dairy cows (Effektivnost' ispol'zovaniya fermentnykh preparatov v ratsionakh molochnykh korov). *Head of Animal Breeding*. 2011;(9):30-33. [in Russian] (Воынкина М. Эффективность использования ферментных препаратов в рационах молочных коров. *Главный зоотехник*. 2011;(9):30-33).
- Winter rye. Cultivation, use for food, feed and technical purposes. Problems and solutions (Ozimaya rozh. Vozdelyvanie, ispol'zovanie na pishchevye, kormovye i tekhnicheskie tseli. Problemy i resheniya). Moscow: Rosinformagrotekh; 2007. [in Russian]. (Озимая рожь. Возделывание, использование на пищевые, кормовые и технические цели. Проблемы и решения. Москва: Росинформагротех; 2007).

Информация об авторах

Ольга Владимировна Солодухина, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, отдел генетики, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР), Россия, 190031 Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, osolodukhina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3117-6693>.

Information about the authors

Olga V. Solodukhina, Dr. Sci. (Biology) Leading Researcher, Department of Genetics, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190031 Russia, osolodukhina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3117-6693>

Вклад авторов: автор сделал самостоятельный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the author contributed to this article all alone.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the author declares no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; одобрена после рецензирования 07.05.2024; принята к публикации 27.05.2024.

The article was submitted on 19.04.2024; approved after reviewing on 07.05.2024; accepted for publication on 27.05.2024.