

**ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕНТОЗАНОВ ОЗИМОЙ РЖИ
В ПРОЦЕССЕ СОЗРЕВАНИЯ ЗЕРНА****М. Л. Пономарева, Г. С. Маннапова, С. Н. Пономарев, Д. Д. Сайфутдинова**

Реферат. Исследование проводили в 2018–2019 годах в Республике Татарстан с целью оценки динамики накопления общих и водорастворимых пентозанов (ВРП) на разных этапах формирования зерна для разработки методов селекции ржи с заданным уровнем этих полисахаридов. Материалом для исследования служили шесть сортов озимой ржи (Татарская 1, Радонь, Памяти Кунакбаева, Подарок, Огонек, Марусенька). Пробы зерна отбирали в фазы молочной, восковой, полной и физиологической (через 10 дней после уборки) зрелости. Из средней части колоса каждого сорта выделяли по 600 зерен, разделяя морфолого-гистологическим методом на зародыш, эндосперм и оболочки для последующего анализа пентозанов. Моносахаридный состав определяли методом высокоэффективной ионнообменной хроматографии, содержание общих и водорастворимых пентозанов — орцин-хлоридным методом, вязкость водного экстракта — на синусоидальном вискозиметре. Содержание олиго- и полисахаридов в водных экстрактах ржаного шрота составляло 52...74% от общего количества экстрагированных углеводов. Количество ксилоры у сортов Татарская 1, Радонь и Памяти Кунакбаева находилось на уровне 14...16 мг/мл, Огонек, Подарок и Марусенька — 9...11 мг/мл. Вязкость экстрактов коррелировала с уровнем ВРП ($r=0,972$ и $r=0,615$ в 2018 и 2019 годах). Доля арабиноксиланов в оболочках зерна возрастала с молочной (34,3%) до физиологической спелости (39,8%). Исследование выявило значимые сортовые различия в накоплении пентозанов и их пространственно-временную динамику в зерне. Уровень общих пентозанов в эндосперме снижался с 7% (молочная спелость) до 4,3% (физиологическая спелость), в зародыше — с 14,5% (восковая спелость) до 13,5% (физиологическая спелость). В оболочках содержание ВРП уменьшалось с молочной до полной спелости (с 5,04% до 3,15%), но возрастало до 3,9% к физиологической зрелости. Пик концентрации ВРП в эндосперме и зародыше наблюдали в полную спелость (соответственно 4,8% и 2,6%), после чего снижался к физиологической зрелости.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L.), водорастворимые пентозаны, арабиноксиланы, вязкость водного экстракта, фаза развития зерновки.

Введение. Арабиноксиланы (АК) — главные нецеллюлозные полисахариды, относящиеся к структурным компонентам клеточных стенок крахмального эндосперма и алейронового слоя злаковых культур [1]. Их часто называют пентозанами, поскольку они состоят из пентоз — арабинозы и ксилоры [2, 3]. В то же время, некоторые ученые рассматривают пентозаны как более широкий термин для обозначения полисахаридов, состоящих преимущественно из пятиуглеродных сахаров, а арабиноксиланы — специфический тип пентозанов [4, 5], состоящий преимущественно из арабинозы и ксилоры, или даже отождествляют водорастворимые пентозаны с арабиноксиланами [6, 7].

В российской научной литературе используют оба термина [8]. Независимо от терминологии, арабиноксиланы (или пентозаны) считают ключевым компонентом зерна, определяющим его технологические характеристики и ценность как сырья, а также служат важным источником пищевых волокон, особенно в ржаной муке.

В рамках проекта HEALTHGRAIN [9] была установлена более высокая концентрация АК в озимой ржи (*Secale cereale* L.), по сравнению с пшеницей, которая варьирует от 3,11% до 4,31% сухого вещества в ржаной муке. Эти полисахариды определяют технологические свойства зерна, его ценность как сырья и служат важным источником пищевых волокон [10].

Растущий интерес к арабиноксиланам обусловлен их ролью в модуляции иммунной системы. Они нормализуют уровень глюкозы и снижают концентрацию триглицеридов и холестерина в крови, улучшают кишечную микробиоту [11].

В связи с этим разработка селекционных программ для озимой ржи ориентирована на создание сортов, соответствующих современным требованиям к качеству и функциональности. Повышение эффективности производства ржаного хлеба предполагает выведение высокоурожайных сортов с высоким содержанием арабиноксиланов и сбалансированной структурой зерна. Использование ржи в качестве корма для животных предполагает снижение содержания пентозанов, особенно их водорастворимой фракции. Таким образом, углубленное изучение процессов накопления этих биополимеров в зерне озимой ржи приобретает особую актуальность в контексте разностороннего назначения сортов.

Арабиноксиланы характеризуются структурной неоднородностью, определяющей их способность связывать воду и формировать гелеподобные структуры [12, 13]. Гетерогенность молекул АК обусловлена наличием замещающих молекул арабинозы, а также боковыми олигомерными цепями [14].

Для зерна пшеницы арабиноксиланы играют ключевую роль в регуляции процессов гидратации как в процессе развития, так и после десикации. Увеличение толщины

клеточных стенок наружных слоев эндосперма коррелирует с повышением содержания арабиноксиланов, что снижает внутреннее поглощение и внешнюю диффузию воды [14, 15]. Исследования выявили наличие арабиноксиланов на ранних этапах дифференциации клеток эндосперма в созревающем зерне пшеницы, их количество увеличивалось по мере развития [16]. Активный синтез арабиноксиланов в зерне пшеницы происходил до 28-го дня развития и завершался к 42-му дню роста [17]. Для озимой ржи анализ содержания пентозанов в различные фазы созревания зерна не проводили, что делает эти исследования актуальными.

Цель исследования – оценка динамики накопления пентозанов в процессе формирования зерна для разработки методов селекции ржи с заданным уровнем этих полисахаридов.

Условия, материалы и методы. Исследование проводили в 2018–2019 годах в питомнике конкурсного сортоиспытания озимой ржи Татарского научно-исследовательского института сельского хозяйства Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН) (Республика Татарстан). Образцы зерна отбирали в 4 фенологические фазы по мере созревания зерна: на 19...21 сутки после

цветения (молочная спелость), на 39...40 сутки после цветения (восковая спелость), на 44...46 сутки после цветения (полная спелость) и на 59...60 сутки после цветения (физиологическая спелость, через 10 дней после уборки урожая). Пробы зерна в фазе физиологической зрелости использовали также для оценки моносахаридного состава. Эти фенологические фазы соответствовали стадиям 77, 87 и 91, 99 шкалы ВВСН, принятой для развития зерновых культур [18].

Продолжительность исследуемых фенологических фаз и метеорологические условия во время роста озимой ржи (в частности, температура и осадки) отличались в разные годы (табл. 1). Эти различия влияли на развитие зерновки на разных стадиях. В 2018 году фазы восковой и полной спелости проходили в условиях крайнего дефицита влаги или полного отсутствия осадков. В 2019 году период молочной спелости совпал с избытком влаги (56 мм) и был на шесть суток продолжительнее, но последующий период формирования зерна проходил в условиях засухи (ГТК=0,49) и был аналогичен по продолжительности 2018 году. Кроме того, температурный режим всех фаз налива и созревания зерна во второй год исследований оказался ниже на 2,1...6,0°C, по сравнению с показателями первого года эксперимента.

Таблица 1 – Характеристика метеопараметров по фазам налива и созревания зерна

Фаза налива и созревания зерна	Продолжительность фазы, сут.		Среднесуточная температура за период, °C		Осадки за период, мм		ГТК за период	
	2018 год	2019 год	2018 год	2019 год	2018 год	2019 год	2018 год	2019 год
Молочная	11...12	17...18	22,7	16,7	10	56	0,40	1,96
Молочно-восковая	7	7	22,3	19,9	28	17	1,79	1,21
Восковая	9...10	8...10	22,3	20,2	0	8	0	0,49
Полная	4	4	20,6	16,4	0	11	0	1,68

Объектом исследования послужили шесть сортов озимой ржи – Татарская 1, Радонь, Подарок и Огонёк (селекции ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН), Марусенька (селекции Научно-исследовательского института сельского хозяйства Юго-Востока) и Памяти Кунакбаева (селекции Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства Уфимского Федерального исследовательского центра РАН). Для получения ржаного шрота (степень извлечения 96...98%) среднюю пробу зерна каждого сорта (300 г) размалывали на лабораторной мельнице Laboratory mill 3100 (Perten Instruments, Швеция).

Определение моносахаридного состава проводили методом высокоэффективной ионообменной хроматографии с использованием системы DX-500 (Dionex, США) и электрохимического детектора (модель ED 40, Dionex, США) в режиме пульс-амперометрии.

Для анализа состава мономерных углеводов в водорастворимой фракции проводили хроматографический анализ супернатанта без предварительного этапа гидролиза. Гликозидные связи полимерных углеводов разрушали часовым гидролизом в 2М трифторуксусной кислоте при 120°C. Полученные моносахариды анализировали с помощью хроматографии. Содержание отдельных моносахаридов определяли по предварительно построенным калибровочным кривым с помощью программного обеспечения PeakNet.

Для оценки динамики содержания пентозанов отбирали по 600 зёрен одинакового размера из средней части колоса каждого сорта на каждой фазе формирования и развития зерна. Зерна разделялись на зародыш, эндосперм и оболочки анатомо-гистологическим методом, после чего фиксировали в пробирках эппендорф в жидком азоте и хранили при -80 °C.

Методики отбора проб, разделения зерен и анализа содержания общего количества и экстрагируемой водой фракции арабиноксиланов (микрометод Hashimoto et al. (1987) [19] в модификации Delcour et al. (1995) [20]) подробно изложены в предыдущей публикации [21]. Метод предполагает кислотный гидролиз водного экстракта ржи с последующим колориметрическим определением продуктов реакции с орцином моногидратом. Длительность замачивания, необходимого для последующей разделения оболочек и эндосперма, варьировала в зависимости от стадии зрелости зерна: 4...5 ч для стадии восковой спелости и 34...36 ч для стадий полной и физиологической спелости. Зерно в стадии молочной спелости не требовало предварительного замачивания ввиду его высокой влажности. При этом доля зародыша в зерновке на данной стадии составляет около 1%, что препятствует его выделению морфолого-гистологическими методами. Перед определением общего содержания пентозанов (ОП) и водорастворимой фракции пентозанов (ВРП) морфологические части зерновки высушивали до постоянной влажности.

Анализ вязкости водного экстракта (ВВЭ) проводили на образцах, приготовленных по методике Boros с соавторами [22] при температуре 30°C. Водно-мучную суспензию получали путём смешивания ржаного шрота с дистиллированной водой в соотношении 1:5 с последующим встряхиванием в течение 1 ч и центрифугированием при $10\,000 \times g$ в течение 10 мин. Динамическую вязкость супернатанта измеряли с помощью синусоидального вибрационного вискозиметра Vibro Viscometer SV-1A (A&D, Япония). Анализ проводили в автоматизированном режиме при температуре 30°C в трехкратной повторности

для повышения точности измерений. Значения динамической вязкости регистрировали в миллипаскалях на секунду (мПа×с).

Для проведения статистического анализа результатов применяли программное обеспечение AGROS версии 2.13 и пакет Excel 7.0. Для определения значимости различий между сортами по анализируемым признакам использовали однофакторный дисперсионный анализ, дополненный попарными межгрупповыми сравнениями с использованием теста Дункана ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение. В водных экстрактах ржаного шрота были идентифицированы олиго- и полисахариды (23...40 мг/мл), представленные ксилозой, глюкозой, арабинозой и галактозой, доля которых составила 52...74% от общего количества экстрагированных углеводов. Водная экстракция приводила к высвобождению крахмала, смешанно-связанных глюканов и арабиноксиланов. При гидролизе поли- и олигосахаридов разрушаются гликозидные связи с отщеплением моносахаридов, которые могут также образовываться благодаря ферментативной активности экзоферментов зерна ржи.

В водных экстрактах сортов ржи Огонек, Подарок и Марусенька содержалось 9...11 мг ксилозы на 1 мл экстракта, в то время как у сортов Татарская 1, Радонь и Памяти Кунакбаева 14...16 мг ксилозы на мл экстракта (рис. 1). У сорта Татарская 1 отмечено наибольшее содержание арабинозы (4,7 мг/мл пробы), что на 45% выше, чем у сорта Марусенька. Содержание галактозы варьировало от 0,9 мг/мл (Подарок, Марусенька) до 1,4 мг/мл (Памяти Кунакбаева). Содержание глюкозы в водном экстракте сорта Татарская 1 достигало 18,3 мг/мл, что в 2 раза выше, чем у сорта Подарок.

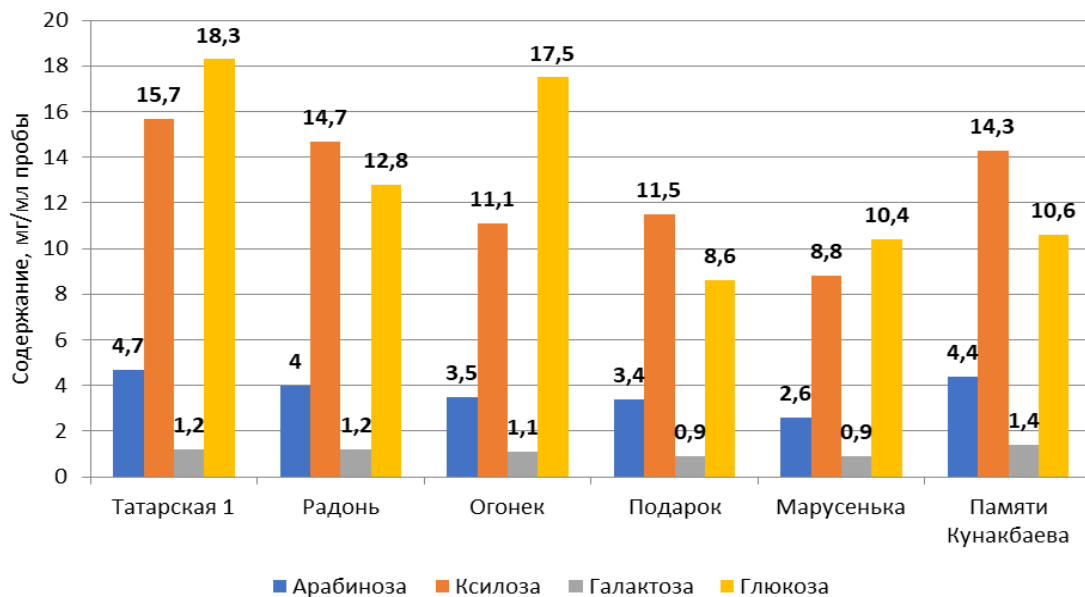


Рис. 1 – Состав олиго- и полисахаридных фрагментов углеводов водных экстрактов шрота различных сортов ржи (среднее за 2018–2019 годы; $НСП_{05}$ для арабинозы – 0,4 мг/мл пробы, ксилозы – 2,1 мг/мл пробы, галактозы – 0,2 мг/мл пробы, глюкоза – 1,8 мг/мл пробы)

Соотношение арабинозы к ксилозе, традиционно применяемое для оценки степени замещения в молекулах арабиноксиланов, для водных экстрактов ржаного шрота находилось на уровне 0,3. Таким образом, из каждых 10 остатков ксилозы в молекулярной структуре лишь 3 могут быть замещены арабинозой. Наличие заместителей, таких как галактоза и глюкоза, а также разветвленная пространственная структура молекулы углеводов способствует увеличению гидрофильности и способности арабиноксиланов связывать воду. На микроуровне данное явление можно объяснить включением воды в микроструктуру зерновки. Эта структура формируется биополимерами, представленными белками и крахмалом, что обеспечивает функциональные свойства и повышает водосвязывающую способность пентозанов.

Сорта Татарская 1 и Памяти Кунакбаева

продемонстрировали наивысшие показатели вязкости водного экстракта (ВВЭ) в 2018 и 2019 годах соответственно (39,2 и 44,9 мПа×с). Сорт Марусенька, напротив, характеризовался самой низкой вязкостью в оба года (9,6 и 11,0 мПа×с). В среднем, Татарская 1 показала самую высокую вязкость за годы исследования (36,4 мПа×с), значительно превосходя Марусеньку (в 3,5 раза). Подобную картину наблюдали и с водорастворимой фракцией пентозанов: наибольшее содержание ВРП отмечено у Татарской 1 в 2018 году (2,10%) и у Памяти Кунакбаева в 2019 году (3,95%, среднее 2,88%). Сорта Память Кунакбаева и Марусенька показали значительные колебания ВРП между годами (разница в 2,2 и 2,4 раза соответственно). Наименьшие величины ВРП были зафиксированы у сорта Марусенька в 2018 году (1,22%) и у сорта Подарок в 2019 году (2,01%) (табл. 2).

Таблица 2 – Динамическая вязкость водного экстракта ржаного шрота (ВВЭ, мПа×с) и содержание водорастворимой фракции пентозанов (ВРП, %) в физиологической спелости у сортов озимой ржи*

Сорт	2018 год		2019 год		Среднее	
	ВВЭ	ВРП	ВВЭ	ВРП	ВВЭ	ВРП
Татарская 1	39,2 ^e	2,10 ^d	33,7 ^d	3,47 ^b	36,4	2,78
Радонь	34,9 ^d	2,03 ^{cd}	24,9 ^c	3,23 ^{ab}	29,9	2,63
Памяти Кунакбаева	23,7 ^c	1,82 ^b	44,9 ^e	3,95 ^{cd}	34,3	2,88
Подарок	18,0 ^b	1,63 ^b	23,3 ^{bc}	2,71 ^a	20,6	2,17
Огонек	17,5 ^b	1,57 ^b	20,8 ^b	2,90 ^a	19,1	2,23
Марусенька	9,6 ^a	1,22 ^a	11,0 ^a	3,07 ^{ab}	10,3	2,14
F _{факт} (F _{теор.} =4,39)	635,35	38,83	267,69	57,96		
Коэффициент корреляции Пирсона между ВВЭ и ВРП (r _{крит.} =0,811)	0,972		0,615			

*в каждом столбце средние значения, отмеченные одинаковыми буквами, статистически значимо не различаются согласно тесту Дункана при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Наблюдали сортовую специфику в стабильности показателей вязкости водного экстракта (ВВЭ). Так, сорт Марусенька демонстрирует низкое значение ВВЭ в 2018 и 2019 годах, тогда как другие исследуемые сорта отличаются более выраженной изменчивостью. Например, вязкость экстракта у сорта Памяти Кунакбаева значительно колебалась в течение двух лет, увеличившись почти вдвое: от 23,7 мПа×с в 2018 году до 44,9 мПа×с в 2019 году.

В 2018 году была установлена высокая положительная корреляция между вязкостью водного экстракта (ВВЭ) и содержанием водорастворимой фракции пентозанов (ВРП) ($r=0,972^*$, $r_{крит.}=0,811$, $p<0,05$), что указывает на значимую взаимосвязь между этими характеристиками в условиях засушливого периода формирования зерна. Снижение коэффициента корреляции в 2019 году ($r=0,615 < r_{крит.}=0,811$, $p<0,05$.) позволяет предположить, что повышенная влажность в период налива зерна повлияла на взаимосвязь этих показателей. Работа [20] польских авторов стала первым

упоминанием о корреляции между концентрацией водорастворимых пентозанов и вязкостью водного экстракта зернового шрота.

Результаты дисперсионного анализа, проведенного с использованием теста Дункана ($p<0,05$), указывают на наличие статистически значимых различий между сортами по показателю вязкости в оба года исследований. Так, в 2018 году практически все сорта, за исключением Огонька и Подарка, демонстрировали существенные различия по ВВЭ (табл. 2). Наиболее контрастной парой стали сорта Татарская 1 и Марусенька, имеющие достоверные различия в содержании водорастворимых пентозанов (2,1 и 1,22% соответственно). В 2019 году наблюдали схожую картину с различиями по вязкости водного экстракта. Также были выявлены значимые различия по содержанию ВРП у сортов Татарская 1 и Огонек (3,47 и 2,90% соответственно).

Таким образом, три сорта (Татарская 1, Радонь и Памяти Кунакбаева) характеризуются высоким содержанием пентозанов (2,63...2,88%) и высокой вязкостью водных

экстрактов (29,9...36,4 мПа×с) (табл. 2). Зерно этих высокопентозановых сортов представляет практическую ценность, поскольку может использоваться как водоудерживающий агент, текстуратор и связующий компонент при разработке хлебобулочных изделий. В отличие от них, сорта Огонёк, Подарок и Марусенька отличались низким содержанием водозэкстрагируемых пентозанов (1,82...2,23%) и формировали экстракты с меньшей вязкостью (10,3...20,6 мПа×с). Хотя ВВЭ и ВРП тесно связаны, вязкость водных экстрактов демонстрировала более высокую вариабельность, по сравнению с содержанием водорастворимых пентозанов, определенным с использованием орцинол-хлоридного метода. В связи с этим, при селекционной оценке сортов, содержание ВВЭ представляется более информативным критерием, обеспечивающим лучшую дифференциацию генотипов.

Зерно озимой ржи, подобно другим злакам, морфологически делится на оболочки, крахмалистый эндосперм и зародыш, включающий алейроновый слой и щиток. Наши исследования показали, что в начале фазы налива зерна максимальное содержание общих пентозанов наблюдали в зародыше (14,5%) в восковую спелость и в эндосперме (7,0%) в молочную спелость. В фазе полной спелости их количество снижалось до 12,9% и 4,0% соответственно. В работе Кобылянского с соавторами [15] выявлено, что в алейроновом слое сконцентрированы пентозаны, играющие ключевую роль в процессе прорастания. В ходе набухания зерна происходит их гидролиз с образованием моносахаридов, которые затем участвуют в развитии зародыша.

В процессе созревания зерна, от молочной

до физиологической спелости, наблюдается увеличение концентрации общих пентозанов в его оболочках (с 34,3% до 39,8%) (рис. 2). Это объясняется тем, что пентозаны служат строительным материалом для формирования клеточных стенок и поддержания жизнеспособности зерновки. Тем не менее, существует мнение, что функциональность общих пентозанов выходит за пределы простого участия в строительстве клеточных стенок. Эти пентозаны, согласно литературным данным, играют ключевую роль в адаптации зерна к засушливым условиям, их содержание возрастает при дефиците влаги [23]. Однако исследования, касающиеся связи между пентозанами и динамикой движения воды внутри зерновки озимой ржи, на данный момент отсутствуют [10]. Следовательно, для селекции засухоустойчивых сортов озимой ржи с низким содержанием пентозанов отбор следует вести в направлении увеличения количества пентозанов в оболочках зерновки.

Анализ данных с использованием критерия Дункана выявил статистически значимые различия между сортами в фазы молочной и полной спелости ($p < 0,05$). В фазы восковой и физиологической спелости статистически значимых различий не установлено. Оболочки зерна содержат наибольшее количество общих арабиноксиланов (34,30...39,8%), тогда как в эндосперме их уровень был наименьшим (4,0...5,7%). Арабиноксиланы клеточной стенки ржи выполняют важные биологические функции, возможно, их большое содержание именно в оболочках ржи объясняет высокую устойчивость этой культуры к стрессовым факторам абиотической и биотической природы.

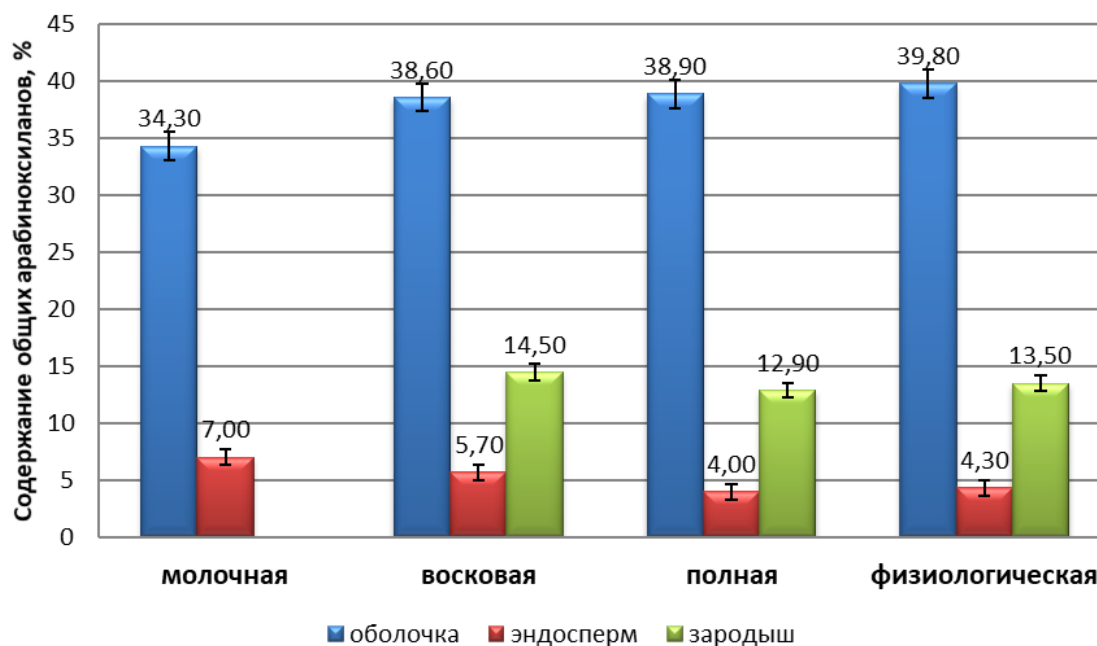


Рис. 2 – Содержание общих пентозанов в 6 сортах озимой ржи по фазам развития зерновки (среднее значение за 2018–2019 годы; $НСП_{05}$ для различий между фазами развития зерновки в оболочке – 3,5%, в эндосперме – 1,3%, в зародыше различия не достоверны), %

В периферийных частях зерновки в молочную спелость накопилось 5,04% ВРП (рис. 3). Затем их количество снижалось за счет диффундирования в другие части зерна и биохимических преобразований до стадии полной спелости и немного увеличивается при достижении физиологического созревания (3,99%). Содержание водорастворимых пентозанов в эндосперме на стадии молочной спелости было на 1,58% ниже, чем в оболочках зерна

на той же стадии развития. В процессе созревания наблюдали увеличение концентрации этих пентозанов в эндосперме: от 4,16% в восковой спелости до максимального значения 4,80% в фазе полной зрелости, с последующим незначительным снижением до 4,73% в физиологическую спелость. В зародыше изменения ВРП шли иначе: 1,26%→2,64%→1,36% в восковую, полную и физиологическую спелость, соответственно.

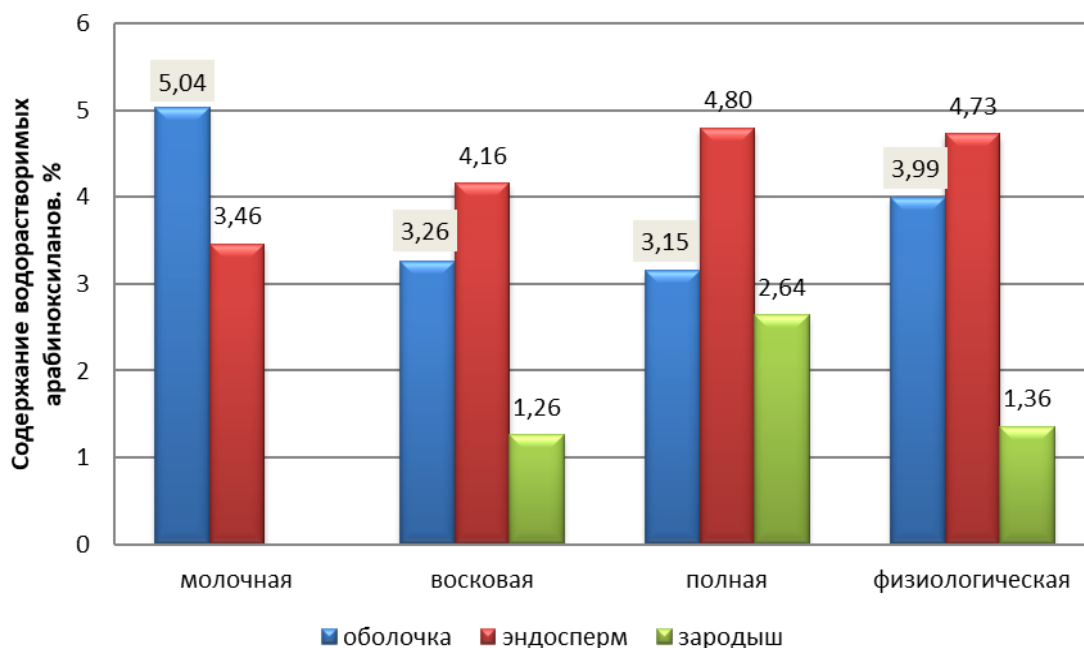


Рис. 3 – Содержание водорастворимых арабиноксиланов в 6 сортах озимой ржи по фазам развития зерновки (среднее значение за 2018–2019 годы; $HCP_{0,5}$ для различий между фазами развития зерновки в оболочке зерна – 1,04%, в эндосперме – 0,58%, в зародыше – 0,47%), %

В сухом зерне (влажность менее 14%) ферменты, присутствующие в эндосперме и зародыше, находясь в связанном или неактивном состоянии [24]. Благодаря этому, содержание ВРП остается стабильным при длительном хранении.

Согласно литературным данным снижение уровня арабиноксиланов в зерне озимой ржи может быть обусловлено несколькими факторами: поздним началом синтеза арабиноксиланов в эндосперме и оболочках зерна, меньшей степенью замещения арабиноксиланов (что снижает их растворимость), а также более низким содержанием крупных углеводов, что может быть связано с особенностями их синтеза или активностью ферментов, участвующих в мобилизации запасных веществ зерна [25]. Уменьшение же содержания пентозанов в зерне ржи может быть связано с мутациями в генах гликозилтрансфераз семейств GT8, GT43, GT47 и GT75 [7]. В связи с этим, секвенирование этих генов у сортов ржи с контрастным содержанием пентозанов, таких как Татарская 1 и Марусенька, представляет значительный научный интерес.

Выводы. В водных экстрактах ржаного шрота идентифицированы олиго- и

полимерные углеводы (ксилоза, глюкоза, арабиноза, галактоза), доля которых составляет 52...74% от общего количества экстрагируемых углеводов. Сорта ржи различаются по содержанию ксилозы. У Татарской 1, Радони и Памяти Кунакбаева оно выше (14...16 мг/мл), чем у сортов Огонёк, Подарок и Марусенька (9...11 мг/мл).

Вязкость экстрактов варьирует в зависимости от сорта и года, при этом между величиной этого показателя и содержанием водорастворимых пентозанов существует высокая корреляция (в 2018 году – $r=0,972$, в 2019 году – $r=0,615$). Наибольшая вязкость отмечена у экстракта шрота сорта Татарская 1 (39,2 мПа×с в 2018 году), наименьшая (9,6 мПа×с) – сорта Марусенька.

Установлены различия в содержании общих и водорастворимых пентозанов в процессе налива и созревания зерна, а также пространственная неоднородность их распределения в зерне. Наибольшей долей арабиноксиланов характеризуются оболочки зерна, при этом она возрастала с молочной спелости (34,3%) до физиологической (39,8%). Содержание общих пентозанов в эндосперме снижалось с 7% (молочная спелость) до 4,3%

(физиологическая спелость), в зародыше – с 14,5% (восковая спелость) до 13,5% (физиологическая спелость). Количество водорастворимых пентозанов в оболочках уменьшалось с 5,04% в молочную спелость до 3,15% к полной спелости, а затем в физиологическую спелость увеличивалось до 3,9%. Максимум в эндосперме и зародыше (4,8% и 2,6%) концентрация водорастворимых пентозанов достигает в фазе полной спелости, после чего незначительно снижается ко времени достижения физиологической

зрелости на 0,07% и 1,28% соответственно.

В процессе созревания у озимой ржи происходит перераспределение пентозанов в клеточные стенки и межклеточное пространство оболочек и алейронового слоя, что обеспечивает защиту зерна от неблагоприятных факторов окружающей среды.

Сведения об источнике финансирования. Работа выполнена по государственному заданию НИОКТР №125031003428-9 при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

Литература

1. Izydorczyk M. S. Arabinoxylans / Handbook of hydrocolloids. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. P. 399–461. doi: 10.1016/B978-0-12-820104-6.00016-4.
2. Arabinoxylans / A. Shah, F. A. Masoodi, A. Gani, et al. // Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 173–186. doi: 10.1007/978-3-303-27061-2.
3. Адаптивность сортов озимой ржи по реологическим свойствам суспензии шрота / Т. Я. Ермолаева, Н. Н. Нуждина, Д. В. Говердов, и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 4. С. 27–32. doi: 10.31857/S2500262721040062.
4. Анализ нуклеотидных последовательностей гена гликозилтрансферазы GT47 у сортов ржи, различающихся по содержанию водорастворимых пентозанов в зерне / Е. А. Заикина, Р. Р. Каюмова, А. Р. Кулуев и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 2. С. 112–119. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-112-119.
5. Arabinoxylans as functional food ingredients: A review / E. Zannini, A. Bravo Nunez, A. W. Sahin, et al. Foods // 2022. Vol. 11. No. 7. Article 1026. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/7/1026>. (дата обращения: 7.04.2025). doi: 10.3390/foods11071026.
6. Tse T., Schendel R. R. Cereal grain arabinoxylans: Processing effects and structural changes during food and beverage fermentations // Fermentation. 2023. Vol. 9. No. 10. Article 914. URL: <https://www.mdpi.com/2311-5637/9/10/914>. (дата обращения: 7.04.2025) doi: 10.3390/fermentation9100914.
7. Ибрагимов З. А., Кулуев Б. Р. Молекулярные основы пищевых и кормовых качеств зерна ржи (*Secale cereale*) // Биомик. 2020. Т. 12 (1). С. 8–26. doi: 10.31301/2221-6197.bmc.2020-2.
8. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В., Никонорова И. М. Морфологические особенности низкопентозанового зерна ржи // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. Т. 182. № 2. С. 123–130. doi: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130.
9. The HEALTHGRAIN cereal diversity screen: concept, results, and prospects / J. L. Ward, K. Poutanen, K. Gebruers, et al. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008. Vol. 56. No. 21. P. 9699–9709.
10. Piro M. C., Muylle H., Haesaert G. Exploiting Rye in Wheat Quality Breeding: The Case of Arabinoxylan Content // Plants. 2023. Vol. 12. Article 737. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/4/737>. (дата обращения: 7.04.2025). doi: 10.3390/plants12040737.
11. Research techniques for the quality of wholemeal rye flour/ M. L. Ponomareva, S. N. Ponomarev, G. S. Manparova, et al. // Russian Agricultural Sciences. 2022. Т. 48. № 5. P. 334–343. doi:10.3103/S106836742205007X.
12. Влияние водорастворимых пентозанов на хлебопекарные свойства озимой ржи / Е. Н. Шаболкина, А. А. Бишарев, Н. В. Анисимкина и др. // Зерновое хозяйство России. 2019. № 1. С. 49–51. doi: 10.31367/2079-8725-2019-61-1-49-51.
13. Cereal-derived water-unextractable arabinoxylans: Structure feature, effects on baking products and human health/ M. Huang, J. Bai, D. G. Buccato et al. // Foods. 2024. Vol. 13. No. 15. Article 2369. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/15/2369/notes> (дата обращения: 30.07.2024). doi: 10.3390/foods13152369.
14. Role of Aleurone Cell Walls in Water Diffusion and Distribution within Cereal Grains / R. Ying, T. Li, C. Wu, et al. // J. Cereal Sci. 2020. Vol. 93. Article 102952. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733521019308197>. (дата обращения: 7.04.2025). doi: 10.1016/j.jcs.2020.102952.
15. Prospects of Using Low-Pentosan Grain Fodder Rye for Baking Purposes/ V. D. Kobylansky, L. I. Kuznetsova, O. V. Solodukhina, et al. // Russian Agricultural Sciences. 2019. Vol. 45. P. 1–4. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367419010063#citeas> (дата обращения: 7.04.2025). doi: 10.3103/S1068367419010063.
16. Saulnier L. Types and Functionality of Polysaccharides in Cereal Grains / Cereal Grain-based Functional Foods. Special Collection: 2018 ebook collection 2018. P. 54–84. URL: <https://books.rsc.org/books/edited-volume/750/chapter-abstract/467680/Types-and-Functionality-of-Polysaccharides-in?redirectedFrom=fulltext>. (дата обращения: 7.04.2025). doi: 10.1039/9781788012799-00054.
17. Developing new types of wheat with enhanced health benefits / P. R. Shewry, G. Charmet, G. Branlard, et al. // Trends in Food Science & Technology. 2012. Vol. 25. No. 2. P. 70–77. doi: 10.1016/j.tifs.2012.01.003.
18. Ефремова Т. Т., Чуманова Е. В. Стадии роста и развития пшеницы и их значение в формировании элементов продуктивности // Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. 2023. Т. 9 № 2. С. 54–80. doi: 10.18699/LettersVJ-2023-9-09.
19. Hashimoto S., Shogren M. D., Pomeranz Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products // Cereal Chem. 1987. Vol. 64. No 1. P. 30–34.
20. Enzymes in production of functional food ingredients – the arabinoxylan case / J. A. Delcour, W. F. Broekaert, C. M. Courtin, et al. // The Science of Gluten-Free Foods and Beverages / ed. by E. K. Arendt, F. dal Bello. Grand Rapids: AACC Int. Inc, 2009. P. 129–140.

21. Вариабельность содержания арабиноксиланов в анатомических частях зерновки озимой ржи в период созревания зерна / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Л. Ф. Гильмуллина и др. // Аграрный научный журнал. 2024. №. 9. С. 49–57. doi: 10.28983/asj.y2024i9pp49-57.
22. D. Boros, R. R. Marquardt, B. A. Slominski, et al. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosans content in rye // Cereal Chem. 1993. Vol. 70. P. 575–580.
23. Фенотипическая оценка содержания пентозанов в ржаном шроте методом определения вязкости водного экстракта / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев, Л. Ф. Гильмуллина и др. // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т.29. № 11. С. 32–35.
24. Гамзаева Р. С. Влияние фиторегуляторов эпин и циркон на амилолитическую активность и содержание редуцирующих сахаров в прорастающих зёрнах пивоваренного ячменя // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. №. 44. С. 27–32.
25. Identification of genes involved in the formation of soluble dietary fiber in winter rye grain and their expression in cultivars with different viscosities of whole meal water extract / L. V. Kozlova, A. R. Nazipova, O. V. Gorshkov, et al. // The Crop Journal. 2022. Vol. 10. No. 2. P. 532–549. doi: 10.1016/j.cj.2021.05.008.

Сведения об авторах:

Пономарева Мира Леонидовна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: smponomarev@yandex.ru
 Маннапова Гульназ Сулеймановна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: mgs1980@mail.ru
 Пономарев Сергей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, e-mail: s.ponomarev2020@yandex.ru
 Сайфутдинова Дия Данисовна – научный сотрудник, e-mail: sayfut2009@gmail.com
 Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение «Федерального исследовательского центра «Казанского научного центра Российской академии наук», Казань, Россия

DYNAMICS OF WINTER RYE PENTOSAN FORMATION DURING GRAIN MATURATION

M. L. Ponomareva, G. S. Mannapova, S. N. Ponomarev, D. D. Sayfutdinova

Abstract. The study was conducted in 2018-2019 in the Republic of Tatarstan to assess the dynamics of total and water-soluble pentosans accumulation at different stages of grain formation to develop methods for breeding rye with a given level of these polysaccharides. The material for the study was six varieties of winter rye (Tatarskaya 1, Radon, Pamyati Kunakbaeva, Podarok, Ogonek, Marusenka). Grain samples were collected at the milk, wax, full and physiological (10 days after harvesting) maturity phases. From the middle part of the ear of each variety, 600 grains were isolated, separated by the morphological and histological method into the embryo, endosperm and shells for subsequent analysis of pentosans. The monosaccharide composition was determined by the method of high-performance anion exchange chromatography, the content of total and water-soluble pentosans - by the orcinol chloride method, the viscosity of the aqueous extract - on a sinusoidal viscometer. The content of oligo- and polysaccharides in aqueous extracts of rye meal was 52 ... 74% of the total amount of extracted carbohydrates. The amount of xylose in the varieties Tatarskaya 1, Radon and Pamyati Kunakbaeva was at the level of 14 ... 16 mg/ml, Ogonek, Podarok and Marusenka - 9 ... 11 mg/ml. The viscosity of the extracts correlated with the level of water-soluble pentosans ($r = 0.972$ and $r = 0.615$ in 2018 and 2019). The share of arabinoxylans in grain hulls increased from milk (34.3%) to physiological maturity (39.8%). The study revealed significant varietal differences in the accumulation of pentosans and their spatiotemporal dynamics in grain. The level of total pentosans in the endosperm decreased from 7% (milk ripeness) to 4.3% (physiological maturity), in the embryo - from 14.5% (wax ripeness) to 13.5% (physiological maturity). In the hulls, the water-soluble pentosans content decreased from milk to full maturity (from 5.04% to 3.15%), but increased to 3.9% by physiological maturity. The peak concentration of water-soluble pentosans in the endosperm and embryo was observed at full ripeness (4.8% and 2.6%, respectively), after which it decreased towards physiological maturity.

Key words: winter rye (*Secale cereale* L.), water-soluble pentosans, arabinoxylans, viscosity of aqueous extract, phase of grain development.

References

1. Izydorczyk MS. Arabinoxylans. Handbook of hydrocolloids. Cambridge: Woodhead Publishing. 2021; 399-461 p. doi: 10.1016/B978-0-12-820104-6.00016-4.
2. Shah A, Masoodi FA, Gani A. Arabinoxylans. Food biopolymers: structural, functional and nutraceutical properties. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021; 173-186 p. doi: 10.1007/978-3-303-27061-2.
3. Ermolaeva TYa, Nuzhdina NN, Goverdov DV. [Adaptability of winter rye varieties by rheological properties of meal suspension]. Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka. 2021; 4. 27-32 p. doi: 10.31857/S2500262721040062.
4. Zaikina EA, Kayumova RR, Kuluev AR. [Analysis of nucleotide sequences of GT47 glycosyltransferase gene in rye varieties differing in the content of water-soluble pentosans in grain]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2023; Vol.184. 2. 112-119 p. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-112-119.
5. Zannini E, Bravo Nunez A, Sahin AW. Arabinoxylans as functional food ingredients: a review. [Internet]. Foods. 2022; Vol.11. No.7. Article 1026. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/7/1026>. doi: 10.3390/foods11071026.
6. Tse T, Schendel RR. Cereal grain arabinoxylans: Processing effects and structural changes during food and beverage fermentations. [Internet]. Fermentation. 2023; Vol.9. No.10. Article 914. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://www.mdpi.com/2311-5637/9/10/914>. doi: 10.3390/fermentation9100914.
7. Ibragimova ZA, Kuluev BR. [Molecular basis of food and feed qualities of rye grain (*Secale cereale*)]. Biomika. 2020; Vol.12 (1). 8-26 p. doi: 10.31301/2221-6197.bmc.2020-2.
8. Kobylanskiy VD, Solodukhina OV, Nikonorova IM. [Morphological features of low-pentosan rye grain]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2021; Vol.182. 2. 123-130 p. doi: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130.
9. Ward JL, Poutanen K, Gebruers K. The HEALTHGRAIN cereal diversity screen: concept, results, and prospects. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008; Vol.56. No.21. 9699-9709 p.
10. Piro MC, Muylle H, Haesaert G. Exploiting rye in wheat quality breeding: the case of arabinoxylan content. [Internet]. Plants. 2023; Vol.12. Article 737. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://www.mdpi.com/2223->

7747/12/4/737. doi: 10.3390/plants12040737.

11. Ponomareva ML, Ponomarev SN, Mannapova GS. Research techniques for the quality of wholemeal rye flour. *Russian Agricultural Sciences*. 2022; Vol.48. 5. 334-343 p. doi:10.3103/S106836742205007X.

12. Shabolkina EN, Bisharev AA, Anisimkina NV. [The effect of water-soluble pentosans on the baking properties of winter rye]. *Zernovoe khozyaystvo Rossii*. 2019; 1. 49-51 p. doi: 10.31367/2079-8725-2019-61-1-49-51.

13. Huang M, Bai J, Buccato DG. Cereal-derived water-unextractable arabinoxylans: Structure feature, effects on baking products and human health. [Internet]. *Foods*. 2024; Vol.13. No.15. Article 2369. [cited 2024, July 30]. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/15/2369/notes>. doi: 10.3390/foods13152369.

14. Ying R, Li T, Wu C. Role of aleurone cell walls in water diffusion and distribution within cereal grains. [Internet]. *J. Cereal Sci.* 2020; Vol.93. Article 102952. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733521019308197>. doi: 10.1016/j.jcs.2020.102952.

15. Kobylyansky VD, Kuznetsova LI, Solodukhina OV. Prospects of using low-pentosan grain fodder rye for baking purposes. [Internet]. *Russian Agricultural Sciences*. 2019; Vol.45. 1-4 p. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367419010063#citeas>. doi: 10.3103/S1068367419010063.

16. Saulnier L. Types and functionality of polysaccharides in cereal grains. *Cereal grain-based functional foods*. [Internet]. Special collection: 2018 ebook collection 2018; 54-84 p. [cited 2025, April 7]. Available from: <https://books.rsc.org/books/edited-volume/750/chapter-abstract/467680/Types-and-Functionality-of-Polysaccharides-in?redirectedFrom=fulltext>. doi: 10.1039/9781788012799-00054.

17. Shewry PR, Charmet G, Branlard G. Developing new types of wheat with enhanced health benefits. *Trends in Food Science & Technology*. 2012; Vol.25. No.2. 70-77 p. doi: 10.1016/j.tifs.2012.01.003.

18. Efremova TT, Chumanova EV. [Stages of wheat growth and development and their importance in the formation of productivity elements]. *Pisma v Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii*. 2023; Vol.9. 2. 54-80 p. doi: 10.18699/LettersVJ-2023-9-09.

19. Hashimoto S, Shogren MD, Pomeranz Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products. *Cereal Chem.* 1987; Vol.64. No.1. 30-34 p.

20. Delcour JA, Broekaert WF, Courtin CM. Enzymes in production of functional food ingredients – the arabinoxylan case. *The Science of Gluten-Free Foods and Beverages*. Edited by E.K. Arendt, F. dal Bello. Grand Rapids: AACC Int. Inc. 2009; 129-140 p.

21. Ponomareva ML, Ponomarev SN, Gilmullina LF. [Variability of arabinoxylan content in anatomical parts of winter rye grain during grain ripening]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2024; 9. 49-57 p. doi: 10.28983/asj.y2024i9pp49-57.

22. Boros D, Marquardt RR, Slominski BA. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosans content in rye. *Cereal Chem.* 1993; Vol.70. 575-580 p.

23. Ponomareva ML, Ponomarev SN, Gilmullina LF. [Phenotypic assessment of pentosan content in rye meal by determining the viscosity of aqueous extract]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2015; Vol.29. 11. 32-35 p.

24. Gamzaeva RS. [Effect of phyto regulators epin and zircon on amylolytic activity and content of reducing sugars in germinating grains of malting barley]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; 44. 27-32 p.

25. Kozlova LV, Nazipova AR, Gorshkov OV. Identification of genes involved in the formation of soluble dietary fiber in winter rye grain and their expression in cultivars with different viscosities of whole meal water extract. *The Crop Journal*. 2022; Vol.10. No.2. 532-549 p. doi: 10.1016/j.cj.2021.05.008.

Authors:

Ponomareva Mira Leonidovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Research fellow, e-mail: smponomarev@yandex.ru

Mannapova Gulnaz Suleymanovna – PhD in Agricultural Sciences, leading research fellow, e-mail: mgs1980@mail.ru.

Ponomarev Sergey Nikolaevich – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Research fellow, e-mail: s.ponomarev2020@yandex.ru

Sayfutdinova Dilya Danisovna – Research fellow, e-mail: sayfut2009@gmail.com

Tatar Research Institute of Agriculture – a separate structural division of Federal Research Center of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.