

АГРОНОМИЯ

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология

Научная статья

УДК 633.14:631.524.6

doi: 10.28983/asj.y2024i9pp49-57

**Вариабельность содержания арабиноксиланов в анатомических частях зерновки озимой ржи в период созревания зерна**

**Мира Леонидовна Пономарева, Сергей Николаевич Пономарев, Лилия Фирдавиевна Гильмуллина, Гульназ Сулеймановна Маннапова**

Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия, e-mail: smponomarev@yandex.ru

**Аннотация.** В работе проанализированы особенности накопления общих и водорастворимых арабиноксиланов в разных частях зерна на шести сортах озимой ржи, три из которых высокопентозановые и три – низкопентозановые. Наибольшее накопление ОАК наблюдалось в оболочках зерновки – 33,49–42,78 %. Максимальное накопление ВРАК наблюдали в эндосперме (61,9–74,3 %), а в зародыше и оболочках водорастворимая фракция составляла только десятую часть от общего содержания арабиноксиланов. Продемонстрирована значительная пространственная неоднородность водорастворимых и общих АК в морфо-структурных частях зерновки и выявлены статистические различия между изучаемыми сортами озимой ржи, а также различный ход их формирования в процессе созревания зерна. После достижения физиологической зрелости количество ВРАК остается константным. Локализация АК в разных тканях зерновки была самым значительным источником вариации их количества, как для ОАК, так и ВРАК. Различный сценарий накопления ОАК и ВРАК в частях зерновки у низко- и высокопентозановых сортов, вероятно, связан со временем их аккумуляции или с деятельностью эндогенных ферментов зерна или их ингибиторов.

**Ключевые слова:** рожь; арабиноксиланы; водорастворимая фракция; зерно; эндосперм; зародыш; оболочки; сорт

**Для цитирования:** Пономарева М. Л., Пономарев С. Н., Гильмуллина Л. Ф., Маннапова Г. С. Вариабельность содержания арабиноксиланов в анатомических частях зерновки озимой ржи в период созревания зерна // Аграрный научный журнал. 2024. № 9. С. 49–57. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp49-57>.

AGRONOMY

Original article

**Variability of arabinoxylan content in anatomical parts of winter rye grain during the ripening period**

**Mira L. Ponomareva, Sergey N. Ponomarev, Lilia F. Gilmullina, Gulnaz S. Mannapova**

Tatar Scientific Research Institute of Agriculture -subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia, e-mail: smponomarev@yandex.ru

**Abstract.** The accumulation of total arabinoxylans (TAX) and water soluble arabinoxylans (WSAX) in different parts of the grain was analysed in six winter rye cultivars (Tatarskaya 1, Radon, Pamyati Kunakbaeva and Ogonek, Podarok, Marusenka), three of which were high- and three low pentosans. The highest accumulation of WSAX was observed in the shells (33.49–42.78 %). The maximum accumulation of WSAX was observed in the endosperm (61.9–74.3 %), while in the embryo and the shells (seed coat and pericarp) the water-soluble fraction represented only one tenth of the total arabinoxylan content. A significant spatial heterogeneity of water-soluble and total AXs in morpho-structural parts of the grain was demonstrated, and statistical differences between the winter rye varieties studied were revealed, as well as a different course of their formation during grain maturation. After reaching physiological maturity, the amount of WSAX remains constant. The localisation of AXs in different grain tissues was the most important source of variation in their amount for both TAX and WSAX. The different accumulation scenario of TAX and WSAX in cereal tissues of low and high pentosans varieties is probably related to the time of their accumulation or to the activities of endogenous cereal enzymes or their inhibitors.

**Keywords:** rye; arabinoxylans; water-soluble fraction; grain; endosperm; embryo; shells; variety

**For citation:** Ponomareva M. L., Ponomarev S. N., Gilmullina L. F., Mannapova G. S. Variability of arabinoxylan content in anatomical parts of winter rye grain during the ripening period. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(9):49–57. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp49-57>.





**Введение.** В нашей стране рожь входит в пятерку крупнейших по объему производства видов зерна. Товарные ресурсы этого злака используются для хлебопечения, производства кормов для животных и птицы, спирто- и пивоварения, сырья для глубокой переработки. С агрономической точки зрения озимая рожь является одной из самых зимостойких, нетребовательных к плодородию почвы и хорошо приспособленных к различным климатическим и экологическим условиям культур [6].

Важным функциональным показателем, определяющим направление использования ржаного зерна, служат содержание и структурные особенности арабиноксиланов (АК) [10, 19]. Эти углеводы представляют собой пятиуглеродные моносахара, состоящие из арабинозы и ксилозы, поэтому другой термин, применяемый к данной группе соединений, – пентозаны [4, 16]. Среди зерновых культур рожь признана самым богатым источником арабиноксиланов, который по разным источникам варьирует от 5,45 до 11,5 % [20, 22, 24]. АК объединяют биологически гетерогенные молекулы, отличающиеся степенью полимеризации, последовательностью и пропорцией гликозидных связей, соотношением остатков арабинозы и ксилозы, характером замещения ксилана остатками арабинозы и количеством других заместителей.

Арабиноксиланы не относятся к запасным веществам эндосперма и выделяются из клеточных стенок, алейронового слоя и оболочек зерна при его набухании. Водорастворимые арабиноксиланы (ВРАК) и фракции, не экстрагируемые водой, в сумме составляют общие арабиноксиланы зерна (ОАК). ВРАК концентрируются главным образом в алейроновом слое зерна, в то время как нерастворимые располагаются в его внешних оболочках [9, 13]. Молекулы водорастворимых пентозанов, находясь в полимерном состоянии, характеризуются высокой гидрофильностью и способны поглощать воду на порядок больше своей массы, образуя вязкие слизи [18].

В различных тканях зерновки предполагаются большие различия по содержанию и накоплению АК в процессе формирования зерна. С. Barron et al. [7] показали, в частности на пшенице, что в алейроне и наружном слое перикарпа, образующих фракцию отрубей, полисахариды клеточных стенок составляют до 50 %, в то время как в крахмалистом эндосперме – только 2–3 % от сухой массы. Однако, по данным J.A. Delcour et al. [11], концентрация ВРАК в эндосперме ржи выше, чем в отрубях, образуемых оболочками зерновок и алейроновым слоем. Соотношение водорастворимой фракции АК к общему их количеству в эндосперме составляет 71 %, в зародыше и в наружных оболочках 25 и 14 % соответственно. Остальную часть составляют пентозаны, не экстрагируемые водой [14]. Фракция АК, локализованная в оболочках зерновки, имеет более сложное строение, связанное со степенью ветвления и с соединением полисахарида с белками [23].

Цель данной работы состояла в определении содержания водорастворимых и общих АК в эндосперме, зародыше и оболочках зерна у контрастных генотипов озимой ржи в динамике созревания зерна.

**Материалы и методы.** Объектами исследований были шесть сортов озимой ржи: Подарок, Марусенька, Огонек (низкопентозановые), Радонь, Татарская 1, Памяти Кунакбаева (высокопентозановые). Их выращивали в конкурсном сортоиспытании на селекционной базе ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН (Республика Татарстан, 55°38'60" с. ш., 49°18'25" в. д.) в 2017–2019 гг. Стадии развития зерна соотносили со шкалой ВВСН для зерновых культур [2]. Отборы проб проводили в середине каждой из фенологических фаз развития зерен ржи: молочной (77), восковой (87), полной (91) и физиологической спелости (99). Последняя стадия рассматривалась как физиологически зрелое зерно, которое анализировали через 10 дней после уборки урожая. Для анализа использовали 600 неповрежденных, выровненных по размеру зерен каждого сорта, взятых со средней части колоса.

Общее содержание арабиноксиланов (ОАК) определяли колориметрическим методом после кислотного гидролиза с окрашиванием орцин моногидратом ( $C_7H_8O_2 \cdot H_2O$ , ЧДА) + хлорид железа (III) согласно оригинальной прописи Albaumand Umbreit (1947) в изложении Hashimoto et al. [15]. Биохимический микрометод и алгоритм расчета адаптированы для зерна ржи [12].

Расчет проводили по формуле:

$$\text{ОАК} = A_{670} \cdot 18 \cdot 0,88 \cdot 0,01m,$$

где  $m$  – масса общих пентозанов, %, на калибровочной кривой по стандартным растворам с известной концентрацией ксилозы-Д (+).

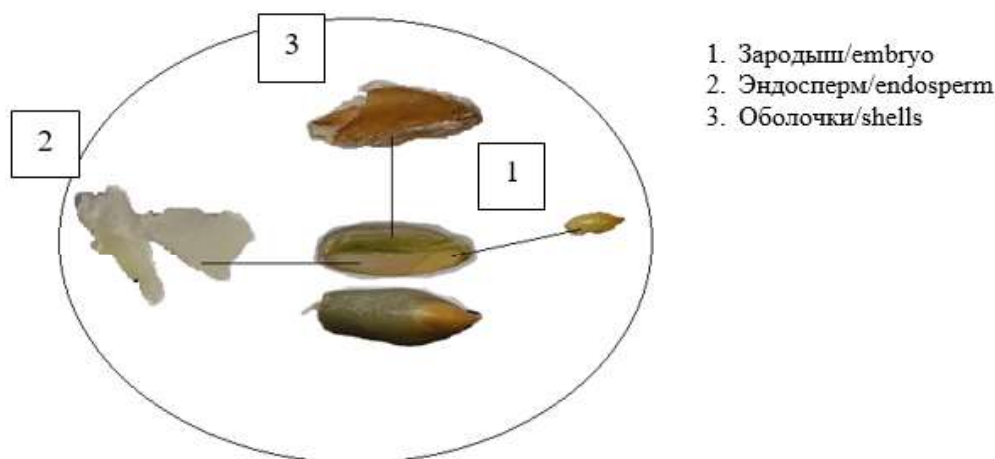
Водную экстракцию образцов для измерения содержания ВРАК готовили в соответствии с методикой [8] при температуре 30 °С.

Расчет проводили по формуле:

$$\text{ВРАК} = A_{670} \cdot 4 \cdot 0,88 \cdot 0,01m,$$

где  $m$  – масса водорастворимых пентозанов, %, на калибровочной кривой по стандартным растворам с известной концентрацией ксилозы-Д (+).

Разделение зерен на морфологические части проводили анатомо-гистологическим методом, адаптированным для ржи Л.Н. Любарским [5]. Для вычленения морфологических частей формирующегося зерна на ранних стадиях развития нами внесены соответствующие коррективы. Для разделения зерна на составные части, а именно на зародыш, оболочку и эндосперм (рисунок 1) использовали эластичный остро отточенный пинцет, препаровальную иглу, предметные стекла, чашки Петри для замачивания зерен, дистиллированную воду.



*Рисунок 1 – Зерно озимой ржи, разделенное на зародыш, эндосперм и оболочки в фазу полной спелости*

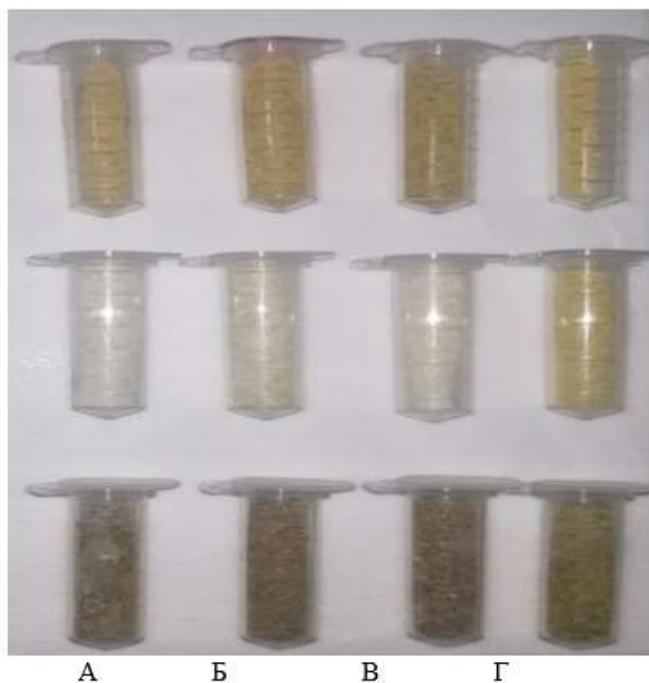
*Figure 1 – Winter rye grain, divided into embryo, endosperm and shells at full ripeness*

В фазу молочной спелости этап замачивания зерна не требовался в связи с высокой влажностью зерновки. Перед замачиванием зерна стерилизовали слабым раствором  $\text{KMnO}_4$  в течение 30 мин, затем промывали дистиллированной водой. Препарирование зародыша в фазу молочной спелости невозможно. На следующих этапах для отделения зародыша зерно замачивали в течение одного часа, для последующего разделения морфологических частей зерна на оболочки и эндосперм в фазу восковой спелости зерновки замачивали в течение 4–5 ч, в фазу полной и физиологической спелости – 34–36 ч.

Для снятия зародыша и щитка делали надрез оболочки пинцетом либо препаровальной иглой, чтобы зерно при дальнейшем замачивании не проросло. После удаления эмбриона и щитка зерно снова переносили в чашки Петри для дальнейшего набухания при комнатной температуре. Для отделения эндосперма от оболочек на предметном стекле, фиксируя пинцетом конец зерна, по бороздке делали надрез препаровальной иглой. Осторожно соскабливая пинцетом, отделяли эндосперм от оболочек. Сложность разделения этих анатомических частей заключалась в том, что между ними нет четкой границы. Поперечные слои плодовой оболочки непечны, поэтому снимались в виде лепестков.

Фиксацию составных частей зерна проводили с использованием жидкого азота в пробирках Эпшендорфа и хранили при  $-80$  °С. Для определения ОАК и ВРАК морфологические составляющие зерновки высушивали до постоянной влажности (рисунок 2).





Зародыш/embryo

Эндосперм/endosperm

Оболочки/shells

А Б В Г

**Рисунок 2 – Морфолого-анатомические части зерновки, отобранные в разные фазы развития растений: А – молочная спелость, Б – восковая спелость, В – полная спелость, Г – физиологическая спелость**

**Figure 2 – Morphological and anatomical parts of the grain sampled at different phases of plant development: А – milk ripeness, В – dough ripeness, С – full ripeness, D – physiological ripeness**

Метеорологические условия формирования зерна в годы исследований были противоположными. Самым продолжительным в оба года был период молочной спелости (12 дней в 2018 г; 17 дней в 2019 г). Эта фаза в 2018 г. проходила в условиях крайней засухи, а в 2019 г. – в условиях избытка влаги. Фаза восковой спелости продолжалась 9 дней в оба года и характеризовалась повышенным увлажнением.

Статистическую обработку проводили путем множественного сравнения средних значений с использованием критерия Дункана (пакет AGROS 2.19 и Excel).

**Результаты исследований.** Среднее содержание ОАК в зародышах разных сортов ржи варьировало от 13,1 до 14,52 % (таблица 1), наибольшим содержанием выделялись сорта Радонь и Огонек. Амплитуда колебаний по фазам спелости составила от 15,9 % у сорта Огонек в фазу восковой спелости до 12,02 % у сорта Татарская 1 в фазу полной спелости. По всем сортам выявлена тенденция снижения ОАК в фазу полной спелости по сравнению с восковой спелостью. Уровень содержания ОАК повышался или оставался на том же уровне при достижении физиологической спелости.

Содержание ВРАК в зародышах зерна изменялось по сортам – от 1,93 % у Татарской 1 до 1,61 % у Памяти Кунакбаева. Анализ показал, что ВРАК увеличивается к стадии полной спелости и снижается через 10 дней после уборки урожая, при достижении физиологической спелости зерна. Отмечено, что сорт Татарская 1 значительно отличался от других сортов по содержанию ВРАК, а сорт Огонек – по ОАК в зародыше зерна (см. таблицу 1).

В эндосперме исследовали пробы, зафиксированные в 4 фазы (таблица 2). Содержание ОАК варьировало от 4,71 до 6,67 %. Максимальная концентрация общих арабиноксиланов была зафиксирована в фазу молочной спелости (5,34–8,22 %). По содержанию общих АК только сорта Подарок и Радонь не проявили частных различий, для остальных установлена статистически существенная разница. Выявлена тенденция снижения ОАК до полной спелости зерна, которые немного повышаются или остаются на том же уровне в физиологическую спелость.

По нашим данным, ВРАК составляли от 74,3 % (Татарская 1, Огонек) до 61,9 % (Марусенька) от общего количества пентозанов в эндоспермальной части зерновки. Последний сорт имел наименьшее содержание водорастворимой фракции (в среднем 3,13 %). Четыре сорта (за исключением Огонька и Памяти Кунакбаева) существенно отличались между собой по содержанию ВРАК в эндосперме (см. таблицу 2).



**Таблица 1– Содержание общих и водорастворимых арабиноксиланов в зародыше зерна сортов озимой ржи, % (2018–2019 гг.)**

**Table 1 – The content of total and water-soluble arabinoxylans in the grain embryo of winter rye varieties, % (2018–2019)**

Сорт / Арабиноксиланы		Фаза созревания зерна			Среднее
		восковая спелость	полная спелость	физиологическая спелость	
Татарская 1	A	1,24	3,37	1,19	1,93d
	B	14,76	12,02	13,64	13,47a
Радонь	A	1,08	2,35	1,54	1,66ab
	B	14,94	12,57	14,55	14,02b
Огонек	A	1,07	2,78	1,56	1,80c
	B	15,90	14,42	13,26	14,53c
Подарок	A	1,63	2,56	1,19	1,79c
	B	13,51	13,32	13,66	13,50a
Памяти Кунакбаева	A	1,32	2,32	1,18	1,61a
	B	13,96	12,22	13,13	13,10a
Марусенька	A	1,21	2,44	1,49	1,71bc
	B	14,15	13,07	13,00	13,41a

Примечание: А – водорастворимые арабиноксиланы, В – общие арабиноксиланы; a–d указывают на то, что значения с одинаковыми буквами статистически незначительны ( $P < 0,0$ ).

**Таблица 2 – Содержание общих и водорастворимых арабиноксиланов в эндосперме по фазам созревания зерна озимой ржи, % (2018–2019 гг.)**

**Table 2 The content of total and water-soluble arabinoxylans in the endosperm by phases of winter rye grain maturation, % (2018–2019)**

Сорт / Арабиноксиланы		Фаза созревания зерна				Среднее
		молочная спелость	восковая спелость	полная спелость	физиологическая спелость	
Татарская 1	A	4,32	3,77	4,30	4,14	4,13e
	B	6,60	5,65	4,62	5,36	5,56c
Радонь	A	2,84	3,94	3,83	4,13	3,68c
	B	7,80	6,33	4,84	4,45	5,85d
Огонек	A	3,12	3,50	3,68	3,70	3,50b
	B	5,34	5,05	4,10	4,36	4,71a
Подарок	A	3,65	4,53	4,09	3,45	3,93d
	B	6,64	5,84	5,73	5,17	5,84d
Памяти Кунакбаева	A	4,52	4,85	4,67	5,18	4,80b
	B	8,22	7,00	5,81	5,64	6,67e
Марусенька	A	2,28	3,06	3,51	3,69	3,13a
	B	7,24	5,54	3,72	3,75	5,06b

Примечание: А – водорастворимые арабиноксиланы, В – общие арабиноксиланы; a–e указывают на то, что значения с одинаковыми буквами статистически незначительны ( $P < 0,05$ ).

Динамика содержания ВРАК различалась: у сорта Татарская 1 количество водорастворимой фракции, накопленное в молочную спелость, снижалось при восковой спелости, затем повышалось при достижении полной спелости и стабилизировалось на более низком уровне в физиологическую спелость. У сортов Радонь и Памяти Кунакбаева ВРАК повышались в восковую спелость на 1,1 и 0,33 % соответственно по сравнению с молочной спелостью, при достижении полной спелости немного снижались и вновь возрастали в физиологическую спелость. У сорта Подарок содержание водоекстрагируемой фракции АК повышалось до восковой спелости (4,53 %) и последовательно снижалось в полную спелость до 4,09 % и в физиологическую до 3,45 %. Сорта Огонек и Марусенька продемонстрировали схожую картину формирования ВРАК: повышались от молочной до физиологической спелости.



Таким образом, нами не только обнаружены значительные частные статистические различия между изучаемыми сортами по содержанию общих и водорастворимых пентозанов в эндоспермальной части зерновки, но и различный ход их формирования в процессе созревания зерна. Наибольшее накопление ОАК наблюдали в оболочках зерновки – 33,49–42,78 % (таблица 3). Среди сортов высоким уровнем данного показателя отличался Радонь, минимальным – Огонек. Доля водорастворимой фракции в оболочках была незначительной (в среднем 10,16 %) и варьировала от 8,5 до 11,8 %, в то же время доля ВРАК от общих пентозанов составляла 12,8 и 68,8 % в зародышах и эндосперме соответственно. Сортные различия были статистически доказаны у Огонька, Подарка, Памяти Кунакбаева и Марусеньки по содержанию ВРАК и у Радони – по ОАК.

Таблица 3 – Содержание общих и водорастворимых арабиноксиланов в оболочках по фазам созревания зерна озимой ржи, % (2018–2019 гг.)

Table 3 – The content of total and water-soluble arabinoxylans in shells by phases of winter rye grain maturation, % (2018–2019)

Сорт / Арабиноксиланы		Фаза созревания зерна				Среднее
		молочная спелость	восковая спелость	полная спелость	физиологическая спелость	
Татарская 1	А	4,05	2,81	3,06	4,40	3,58b
	В	30,55	35,60	36,67	32,20	33,76a
Радонь	А	6,00	2,85	2,64	3,29	3,70b
	В	40,01	42,55	46,23	42,32	42,78e
Огонек	А	3,37	2,29	2,59	3,16	2,85a
	В	28,22	35,00	31,42	39,33	33,49a
Подарок	А	5,97	4,11	3,48	4,13	4,42d
	В	41,33	35,96	35,23	37,67	37,55bc
Памяти Кунакбаева	А	5,59	4,05	3,99	4,85	4,62e
	В	29,98	44,48	42,58	45,64	40,67d
Марусенька	А	5,26	3,45	3,14	4,08	3,98c
	В	35,49	37,96	41,22	41,76	39,11cd

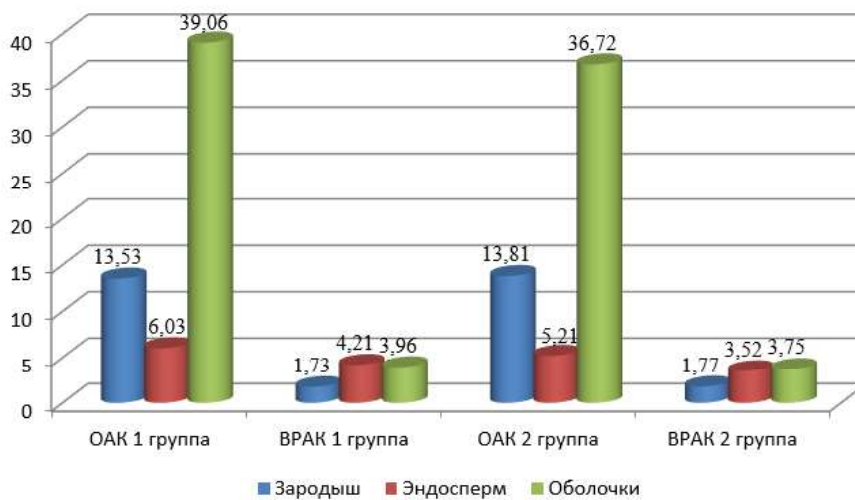
Примечание: А – водорастворимые арабиноксиланы. В – общие арабиноксиланы; а–е указывают на то, что значения с одинаковыми буквами статистически несущественны ( $P < 0,05$ ).

Первые исследования локализации АК ржи [1] показали, что основным местом концентрации арабиноксиланов служат те ткани зерновок, которые состоят из большого числа толстостенных клеток, в частности оболочки зерновки и алейронового слоя. Впоследствии было установлено, что наибольшее количество пентозанов находится в оболочках зерновки 30–35 %, в алейроновом слое – 12–15 %, в зародыше – 6–9 %, в крахмалистой части эндосперма – 4–6 % [3].

Наши исследования были сосредоточены на сравнительном анализе накопления общих и водорастворимых арабиноксиланов, выделенных из разных частей зерна российских сортов озимой ржи, три их которых отнесены к высокопентозановым и три – к низкопентозановым. Трехфакторный дисперсионный анализ, в котором факторами изменчивости были А – сорт, В – фаза развития, С – части зерновки, показал, что локализация АК в разных тканях зерновки была самым значительным источником вариации, как для ОАК, так и ВРАК (95 и 63,4 % соответственно). Эти знания важны для понимания свойств АК и определения возможных целей селекции растений, связанных с этим показателем.

Были установлены различия не только по количественному содержанию ОАК и ВРАК, но и по их размещению в зерне (рисунок 3). Наибольшее содержание общих пентозанов 39,06 и 36,72 % было обнаружено в оболочках зерна в 1-й (высокопентозановые сорта) и 2-й (низкопентозановые сорта) группах соответственно. Максимальное накопление ВРАК наблюдали в эндосперме, разница между высоко- и низкопентозановой группами составила 0,68 %. В целом, между двумя исследуемыми группами сортов показаны различия в содержании ОАК и ВРАК,





**Рисунок 3 – Среднее содержание общих и водорастворимых арабиноксиланов в различных частях зерновки у двух групп сортов, %: 1-я группа (высокопентозановые сорта) – Татарская 1, Радонь, Памяти Кунакбаева; 2-я группа (низкопентозановые сорта) – Огонек, Подарок, Марусенька**

**Figure 3 – The average content of total and water-soluble arabinoxylans in different parts of the grain in two groups of varieties, %: 1 group (high pentosan varieties) – Tatarskaya 1, Radon, Pamyati Kunakbaeva; 2 group (low pentosan varieties) – Ogonek, Podarok, Marusenka**

демонстрирующие большее количество АК у 1-й группы. Исключение составил зародыш зерна, где количественное соотношение между группами сортов было почти равным или немного превышало у низкопентозановой группы. Поскольку доля самого зародыша крайне мала, то для последующих исследований ею можно пренебречь. Среднее значение рассчитывали для зародыша по 3 фазам развития, для эндосперма и оболочек – по 4 фазам развития.

Наши исследования показали содержание ВРАК в порядке убывания: в эндосперме – 4,21 %, в оболочках – 3,96 % и в зародыше – 1,73 % у 1-й группы; в оболочках – 3,75 %, в эндосперме – 3,52 % и в зародыше – 1,77 % у 2-й группы. Максимальное накопление этой фракции было обнаружено в эндосперме и оболочках сорта Памяти Кунакбаева и зародыше сорта Татарская 1. Самым незначительным содержанием водорастворимых АК выделились сорта Памяти Кунакбаева (зародыш), Марусенька (эндосперм) и Огонек (оболочки). Таким образом, нами продемонстрирована значительная пространственная неоднородность водорастворимых и общих АК в зерне разных сортов озимой ржи, которая была ранее показана в зерне пшеницы [25].

Поскольку ВРАК являются основным полимером клеточных стенок эндосперма, то их участие не должно ограничиваться только строительными функциями. Как известно, водорастворимые АК считаются главным источником вязкостных свойств экстрактов ржи [21]. Обладая высокой водосвязывающей способностью, они играют важную роль в определении высокого уровня гидратации влаги в тканях эндосперма, который поддерживается на протяжении всего развития зерновки. По мере созревания зерна происходят биохимические, энзиматические и конформационные превращения АК, которые участвуют в увеличении толщины клеточных стенок, связаны с большой подвижностью воды внутри семени и ее диффузией. Первое транскриптомное исследование [17] выявило гены-кандидаты, связанные с биосинтезом АК, которые дифференциально экспрессируются в разных частях зерновки ржи в период формирования зерна.

**Заключение.** Проведенные исследования показали различия между отдельными сортами и сравниваемыми группами (высокопентозановых и низкопентозановых сортов) не только по количественному содержанию ОАК и ВРАК, но и по их размещению в зерне. Наибольшее накопление ОАК наблюдалось в оболочках зерновки – 33,49–42,78 %. Максимальное накопление ВРАК наблюдали в эндосперме – 61,9–74,3 %, а в зародыше и оболочках водорастворимая фракция составляла только десятую часть от общего содержания арабиноксиланов.

Между исследуемыми группами сортов показаны различия в содержании ОАК и ВРАК, демонстрирующие большее количество АК у высокопентозановой группы. Выявлены статистические различия между изучаемыми сортами по содержанию общих и водорастворимых пентозанов в различных морфологических частях зерновки, а также различный ход их формирования в процессе созревания зерна. По мере формирования и созревания зерна происходят биохимические,



энзиматические и конформационные превращения АК, которые регистрируются изменениями их количества в морфоструктурных элементах зерновки. После достижения физиологической зрелости количество ВРАК остается константным. Локализация АК в разных тканях зерновки была самым значительным источником вариации содержания, как общих, так и водорастворимых пентозанов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дименштейн Ф. И., Ермаков А. И., Княгиничев М. И. Биохимия ржи. Биохимия культурных растений. М.; Л., 1958. Т. 1. С. 165–232.
2. Ефремова Т. Т., Чуманова Е. В. Стадии роста и развития пшеницы и их значение в формировании элементов продуктивности // Письма в Вавилонский журнал генетики и селекции. 2023. Т. 9. № 2. С. 54–80. DOI: 10.18699/LettersVJ-2023-9-09.
3. Исмагилов Р. Р., Ванюшина Т. Н., Аюпов Д. С. Пентозаны ржи. Уфа, 2006. 113 с.
4. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В. Теоретические основы селекции зернофуражной ржи с низким содержанием водорастворимых пентозанов // Сельскохозяйственная биология. 2013. № 2. С. 31–39.
5. Любарский Л. Н. Рожь. М., 1957. 259 с.
6. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Научные основы селекции озимой ржи. Казань, 2019. 352 с.
7. Arabinoxylan content and grain tissue distribution are good predictors of the dietary fibre content and their nutritional properties in wheat product / C. Barron et al. // Food chemistry. 2020. Vol. 328. P. 127111. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127111.
8. Boros D., Marquardt R. R., Slominski B. A. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosan content in rye // Cereal Chemistry. 1993. Vol. 70. P. 575–575.
9. Chawla R., Patil G. R. Soluble dietary fiber // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2010. Vol. 9. P. 178–196. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2009.00099.
10. Cui S. W., Wang Q. Cell wall polysaccharides in cereals: Chemical structures and functional properties // Struct. Chem. 2009. Vol. 20. No. 2. P. 291–297.
11. Delcour J. A., Broekaert W. F., Courtin C. M. Enzymes in production of functional food ingredients – the arabinoxylan case // The Science of Gluten-Free Foods and Beverages. AACCC Int. Inc. 2009. P. 129–140.
12. Delcour J. A., Vanhamel S., De Geest C. Physico-chemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. I. Colorimetric analysis of pentosans and their relative monosaccharide compositions in fractionated (milled) rye products // Cereal Chem. 1989. Vol. 66. No. 2. P. 107–111.
13. Farget A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fibre? // Nutrition Research Reviews. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 65–134. DOI: 10.1017/S0954422410000041.
14. Glitsø L. V., Knudsen K. E. B. Milling of whole grain rye to obtain fractions with different dietary fibre characteristics // Journal of Cereal Science. 1999. Vol. 29. No. 1. P. 89–97.
15. 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.
16. Izydorczyk M. S. Arabinoxylans // Handbook of hydrocolloids. Wood head Publishing. 2021. P. 399–461.
17. 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, L. F. Gilmullina, O. V. Sautkina, N. V. Petrova, O. I. Trofimova, S. N. Ponomarev, M. L. Ponomareva, T. A. Gorshkova // The Crop Journal. 2022. Vol. 10. No. 2. P. 532–549. DOI: 10.1016/j.cj.2021.05.008.
18. Multiple Parameter Assessment of Grain Quality for Populations of Winter Rye with Various Viscosity of Water Extract / A. A. Goncharenko, V. Ya. Chernykh, A. V. Makarov, E. V. Bykova, E. V. Karpushina, N. A. Yashina // Russian Agricultural Sciences. 2022. Vol. 48. No. 2. P. 80–88.
19. Messia M. C. Candigliota T., De Arcangelis E. Arabinoxylans and  $\beta$ -glucans assessment in cereals // Italian Journal of Food Science. 2016. Vol. 29. No. 1. P. 112–122.
20. Németh R., Tömösközi S. Rye: Current state and future trends in research and applications // Acta Alimentaria. 2021. Vol. 50. No. 4. P. 620–640. DOI: 10.1556/066.2021.00162.
21. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N. Composition and molecular-Weight distribution of arabinoxylans of winter rye grain // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9. No. 6. P. 2018–2027.
22. Rosell C. M., Koehler P. Chemistry of Cereal Grains // Handbook on Sourdough Biotechnology. Cham : Springer International Publishing, 2023. P. 25–66.
23. Saulnier L. Types and Functionality of Polysaccharides in Cereal Grains. In book CHAPTER 4: Cereal Grain-based Functional Foods. 2019. P. 54–84. DOI: 10.1039/9781788012799-00054.
24. Shewry P. R. Natural variation in grain composition of wheat and related cereals // Journal of agricultural and food chemistry. 2013. Vol. 61. No. 35. P. 8295–8303.
25. Toole G. A. The effect of environment on endosperm cell-wall development in *Triticum aestivum* during grain filling: an infrared spectroscopic imaging study // Planta. 2007. Vol. 225. No. 6. P. 1393–1403.





## REFERENCES

1. Dimenshtein F. I., Ermakov A. I., Knyaginichev M. I. Biochemistry of rye. *Biochemistry of Cultivated Plants*. Moscow; Leningrad, 1958. P. 165–232. (In Russ.).
2. Efremova T. T., Chumanova E. V. Stages of growth and development of wheat and their significance in the formation of productivity elements. *Letters to the Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;9(2):54–80. (In Russ.). DOI: 10.18699/LettersVJ-2023-9-09.
3. Ismagilov R. R., Vanyushina T. N., Ayupov D. S. Pentosans of rye. Ufa; 2006. 113 p. (In Russ.).
4. Kobylansky V. D., Solodukhina O. V. Theoretical basis of selection of grain-forage rye with low content of water-soluble pentosans. *Agricultural Biology*. 2013;(2):31–39. (In Russ.).
5. Lubarsky L. N. Rye. Moscow; 1957. 259 p. (In Russ.).
6. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N. Scientific bases of selection of winter rye. Kazan: Izd-vo FEN; 2019. 352 p. (In Russ.).
7. Arabinoxylan content and grain tissue distribution are good predictors of the dietary fibre content and their nutritional properties in wheat products / C. Barron et al. *Food Chemistry*. 2020; 328:127111. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127111.
8. Boros D., Marquardt R. R., Slominski B. A. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosan content in rye. *Cereal Chemistry*. 1993;70:575–575.
9. Chawla R., Patil G. R. Soluble dietary fiber. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2010;9:178–196. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2009.00099.
10. Cui S. W., Wang Q. Cell wall polysaccharides in cereals: Chemical structures and functional properties. *Struct. Chem*. 2009;2(2):291–297.
11. Delcour J. A., Broekaert W. F., Courtin C. M., Coesaer H. Enzymes in production of functional food ingredients – the arabinoxylan case. *The Science of Gluten-Free Foods and Beverages*. Ed. by E. K. Arendt and Fabio dal Bello. AACCI Int. Inc. 2009. P. 129–140.
12. Delcour J. A., Vanhamel S., De Geest C. Physico-chemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. I. Colorimetric analysis of pentosans and their relative monosaccharide compositions in fractionated (milled) rye products. *Cereal Chem*. 1989;66(2):107–111.
13. Farget A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews*. 2010;23(1):65–134. DOI: 10.1017/S0954422410000041.
14. Glitsø L. V., Knudsen K. E. B. Milling of whole grain rye to obtain fractions with different dietary fibre characteristics. *Journal of Cereal Science*. 1999;29(1):89–97.
15. Hashimoto S., Shogren M. D., Pomeranz Y. Cereal pentosans: their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products. *Cereal Chem*. 1987;64(1):30–34.
16. Izydorczyk M. S. Arabinoxylans // *Handbook of hydrocolloids*. Wood head Publishing. 2021. P. 399–461.
17. 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, L. F. Gilmullina, O. V. Sautkina, N. V. Petrova, O. I. Trofimova, S. N. Ponomarev, M. L. Ponomareva, T. A. Gorshkova. *The Crop Journal*. 2022;10(2):532–549 DOI: 10.1016/j.cj.2021.05.008.
18. Multiple Parameter Assessment of Grain Quality for Populations of Winter Rye with Various Viscosity of Water Extract / A. A. Goncharenko, V. Ya. Chernykh, A. V. Makarov, E. V. Bykova, E. V. Karpushina, N. A. Yashina. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;48(2):80–88.
19. Messia M. C., Candigliota T., De Arcangelis E., Marconi, E. Arabinoxylans and  $\beta$ -glucans assessment in cereals. *Italian Journal of Food Science*. 2016;29(1):112–122.
20. Németh R., Tömösközi S. Rye: Current state and future trends in research and applications. *Acta Alimentaria*. 2021;50(4):620–640. DOI: 10.1556/066.2021.00162.
21. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N. Composition and molecular-Weight distribution of arabinoxylans of winter rye grain. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018;9(6):2018–2027.
22. Rosell C. M., Koehler P. *Chemistry of Cereal Grains // Handbook on Sourdough Biotechnology*. Cham: Springer International Publishing; 2023. P. 25–66.
23. Saulnier L. Types and Functionality of Polysaccharides in Cereal Grains. In book CHAPTER 4: Cereal Grain-based Functional Foods. 2019. P. 54–84. DOI: 10.1039/9781788012799-00054.
24. Shewry P. R. Natural variation in grain composition of wheat and related cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013;61(35):8295–8303.
25. Toole G. A. The effect of environment on endosperm cell-wall development in *Triticum aestivum* during grain filling: an infrared spectroscopic imaging study. *Planta*. 2007;225(6):1393–1403.

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.  
The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 10.06.2024.

