СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ БИОЛОГИЯ, 2021, том 56, № 3, с. 450-464

Агросистемы будущего

Альтернативные культуры

УДК 633.11:631.52 doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.450rus

КРУПНОЗЕРНЫЙ СОРТ ПЫРЕЯ СИЗОГО (*Thinopyrum intermedium*) СОВА КАК АЛЬТЕРНАТИВА МНОГОЛЕТНЕЙ ПШЕНИЦЕ*

В.П. ШАМАНИН[1], А.И. МОРГУНОВ[1], А.Н. АЙДАРОВ[1], С.С. ШЕПЕЛЕВ[1], А.С. ЧУРСИН[1], И.В. ПОТОЦКАЯ[1] ✉, О.Ф. ХАМОВА[2], L.R. DEHAAN[3]

В последние десятилетия в связи с потеплением климата, экологическими угрозами и возрастанием энергоемкости зернового производства в качестве альтернативы однолетним сельскохозяйственным культурам предложено шире использовать многолетние культуры как более устойчивые к негативным биотическим и абиотическим факторам среды. Крупнозерный сорт пырея сизого Сова выведен в Омском ГАУ посредством массового отбора перезимовавших биотипов из популяции пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey, полученной из The Land Institute (Канзас, США), с последующим направленным переопылением и созданием новой зимостойкой популяции. В 2020 году сорт включен в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, для выращивания во всех регионах Российской Федерации. В настоящей работе впервые показано биологическое и хозяйственное значение крупнозерного сорта пырея сизого Сова в качестве альтернативы многолетней пшенице. Сорт Сова рекомендован для возделывания в течение четырех-шести лет на зерновые и кормовые цели, формирует высокобелковое зерно и сено хорошего качества. Цель исследования — оценить хозяйственно полезные признаки нового крупнозерного сорта пырея сизого Сова в условиях южной лесостепи Западной Сибири, а также определить корреляцию между компонентами колоса и высотой растения для повышения эффективности отбора на увеличение массы 1000 зерен. Исследования проводили на опытном поле Омского ГАУ в условиях южной лесостепи Западной Сибири в 2015-2019 годах. Материалом для исследований служили новый крупнозерный сорт пырея сизого Сова, сорт озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) Омская 4, сорта яровой мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.) Элемент 22 и Памяти Азиева. Оценивали компоненты продуктивности у 100 колосьев пырея сизого: массу и длину колоса, число колосков и зерен в колосе, массу зерна с колоса и др. Рассчитывали массу 1000 зерен в колосе и коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза ($K_{хоз.}$) колоса. Определяли урожайность зерна и вегетативной массы. Анализировали корреляции между компонентами продуктивности и высотой растений. Изучали морфометрические параметры зерновки сорта Сова и яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева (площадь, периметр, длина, ширина и циркулярность). Оценивали качество зерна и сена. У пырея сизого, озимой пшеницы сорта Омская 4 и яровой сорта Элемент 22 определяли длину, ширину, средний диаметр, объем, основную площадь, число корневых кончиков, суммарную длину корней. Оценивали биологическую активность ризосферы пырея сизого в сравнении с сортами озимой пшеницы Омская 4 и яровой мягкой пшеницы Элемент 22. В фазу кущения, после перезимовки и в фазу колошения отбирали пробы почвы для учета микроорганизмов. Установлено, что урожайность зерна, зеленой массы и сена у сорта Сова в течение трех лет репродукции возрастала с каждым годом и в среднем составила соответственно 9,2; 210,3 и 71,0 ц/га. Показатели качества зерна были высокими — 19,4 % белка и 36,3 % клейковины. Число зерен в колосе в среднем составляло более 50 шт., масса 1000 зерен — 9,7 г, $K_{хоз.}$ колоса — 51 %. Длина корней у сорта Сова была в 6,9-9,8 раза больше, а площадь поверхности всех корней — в 8,0 раза больше, чем у озимой и яровой мягкой пшеницы. Суммарная численность агрономически важных групп микроорганизмов у сорта Сова оказалась выше в 2,2 раза, интенсивность процесса минерализации (по соотношению обилия микроорганизмов на крахмал-аммиачном и мясопептонном агаре) — на 58 % выше по сравнению с озимой пшеницей Омская 4. Интенсивность разложения целлюлозы была на 13,7 и 21,4 % выше, чем у сортов пшеницы. Изучение корреляционных связей между массой 1000 зерен, высотой растения и признаками продуктивности выявило целесообразность отбора более короткостебельных биотипов с меньшим числом колосков и зерен в главном колосе для дальнейшего увеличения крупности зерновки.

Ключевые слова: пырей сизый, яровая пшеница, озимая пшеница, селекция, многолетние культуры, сорт Сова, колос, хозяйственно ценные признаки, корреляция, урожайность, зерно, сено, качество зерна, корни, ризосферные микроорганизмы.

В последние десятилетия в связи с потеплением климата, экологическими угрозами и возрастанием энергоемкости зернового производства в

*Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

качестве альтернативы однолетним сельскохозяйственным культурам предлагается шире использовать многолетние. Последние более устойчивы к негативным биотическим и абиотическим факторам среды, способны сохранить почвенный покров на многие годы и сократить потери влаги и питательных веществ, а также поглощать больше углерода, уменьшая парниковый эффект от сельского хозяйства (1). В целом в мире выбросы парниковых газов в результате сельскохозяйственного производства и землепользования составляют более 20 % от их общего количества в атмосфере. В России Парижское соглашение по климату принято Постановлением Правительства РФ от 21 сентября 2019 года № 1228-ПП, однако еще не ратифицировано. Уже наработанные международные практики по оценке и сокращению углеродного следа целесообразно учитывать при развитии российской системы производства растениеводческой продукции. США к 2030 году планируют радикальное снижение и полное прекращение загрязнений и выбросов парниковых газов в сельскохозяйственном секторе.

В растениеводстве значительные площади занимают зерновые культуры. В мире однолетние зерновые культуры обеспечивают около 70 % энергии, потребляемой человеком с пищей, и занимают около 70 % посевных площадей (2). Альтернативная стратегия по созданию многолетних зерновых культур предполагает доместикацию диких видов из трибы *Triticeae* Dum. посредством многократных отборов растений с нужными агрономическими признаками.

В 2003 году в институте Земли (The Land Institute, Канзас, США) стартовал проект по изучению неисчерпаемого потенциала многолетних диких видов. Одним из них был пырей сизый *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey, на основе которого получен сорт многолетнего зернового злака Kernza. Проведено шесть циклов отбора по признакам продуктивности колоса, крупности и легкого обмолота зерна в популяции пырея сизого, в результате чего урожай зерна с единицы площади вырос на 77 %, а масса одного зерна — на 23 % (3). Селекционные программы по созданию многолетней пшеницы посредством гибридизации культурной пшеницы с многолетними дикими сородичами были начаты еще в 1930-е годы в СССР и США, однако до сих пор не дали желаемого эффекта (4). Результаты этих селекционных программ способствовали получению форм пшеницы с интрогрессиями генов, отвечающих за многолетний образ жизни, за счет межгеномных или хромосомных транслокаций (5-7).

Определенные успехи достигнуты в создании октаплоидных пшенично-пырейных гибридов. В обзоре состояния, достижений и перспектив использования современной коллекции многолетних и отрастающих пшенично-пырейных гибридов ($2n$ = 56) Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (8) показано превосходство новых форм по биологическим и хозяйственно ценным признакам по сравнению с гибридами, полученными в период исследований академика Н.В. Цицина (1927-1969 годы). Отобраны стабильные генотипы, имеющие хорошие показатели по степени перезимовки за 2-3 года жизни. Выделены перспективные формы по урожайности, высокому содержанию белка в зерне, хлебопекарным качествам, выходу зеленой массы за три укоса и устойчивости к болезням и вредителям. По мнению ученых, возделывание многолетних культур позволит снизить затраты на производство пищевой и кормовой продукции и улучшить состояние экологии (8).

Гибридизация видов пшеницы с разными видами пырея остается эффективным приемом интродукции чужеродной генетической изменчивости в геном мягкой пшеницы (9-12). Оценка коллекции многолетней

пшеницы проводится в 20 странах (13). Многолетний тип развития имеет полигенный характер наследования, и этот признак невозможно получить посредством единичной интрогрессии в геном культурной пшеницы. Комбинация семи и более пар хромосом пырея обусловливает проявление этого признака при передаче от многолетнего донора (14). Однако, наряду с многолетним типом развития, гибридному потомству передается и множество нежелательных признаков, характерных для пырея, таких как ломкость колоса, трудный обмолот зерна, несинхронное созревание и мелкозерность (15-17).

По мнению ученых из США, проект по идентификации в растениях сорта Kernza генов, отвечающих за признаки доместикации, прежде всего повышенную продуктивность, позволит повысить эффективность селекции по окультуриванию пырея сизого (3, 18). Kernza имеет хорошее качество зерна. Содержание белка, липидов, клетчатки и каротиноидов у этого сорта значительно выше, чем у обычной пшеницы (19-21). Установлено, что для большей части популяций IWG (intermediate wheatgrass) характерна более высокая антиоксидантная активность в зерне, чем у пшеницы (21). Из зерна сорта Kernza изготавливают хлебобулочные и кондитерские продукты. В настоящее время коммерческие продукты выходят под торговой маркой Kernza, принадлежащей The Land Institute (1). Сорт Kernza широко используется и как кормовая культура. В Канаде для повышения его потенциала были предложены посевы в смеси с бобовыми культурами в качестве долгосрочного источника азота вместо неорганических удобрений (22).

В 2020 году в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию (Госреестр), включен уникальный крупнозерный сорт пырея сизого Сова для всех регионов возделывания культуры в России. Сорт Сова создан в Омском ГАУ посредством массового отбора перезимовавших биотипов из популяции пырея сизого (*Thinopyrum intermedium*), полученной из The Land Institute, с последующим направленным переопылением и созданием новой зимостойкой популяции.

В настоящей работе впервые показано биологическое и хозяйственное значение крупнозерного сорта пырея сизого Сова, включенного в Госреестр для регионов России в качестве альтернативы многолетней пшенице. Сорт Сова рекомендован для возделывания в течение четырех-шести лет на зерновые и кормовые цели, формирует высокобелковое зерно и сено хорошего качества.

Цель исследования — оценить хозяйственно полезные признаки нового крупнозерного сорта пырея сизого Сова в условиях южной лесостепи Западной Сибири, а также определить корреляцию между компонентами колоса и высотой растения для повышения эффективности отбора на увеличение массы 1000 зерен.

Методика. Исследования проводили на опытном поле Омского ГАУ (55°02′ с.ш., 73°31′ в.д.) в южной лесостепи Западной Сибири в 2015-2019 годах. Метеорологические условия в годы опытов варьировали и были характерны для указанной зоны, в целом отмечалась недостаточная влагообеспеченность с показателем гидротермического коэффициента (ГТК) в пределах 0,86-1,07. Материалом для исследований служили новый крупнозерный сорт пырея сизого Сова, сорт озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) Омская 4, сорта яровой мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.) Элемент 22 и Памяти Азиева.

В опыте 1 признаки колоса и зерновки в популяции пырея сизого сорта Сова изучали в питомнике размножения (посев 15 мая 2015 года). Посев ручной, площадь делянки — 5 м^2, расстояние между рядками — 40 см, между растениями — 10 см, глубина посева семян — 2 см, без повторностей. Предшественник — чистый пар. В 2016-2017 годах проводили отбор по главному колосу в фазу восковой спелости, колосья срезали и в лаборатории оценивали компоненты продуктивности у 100 колосьев по следующим признакам: масса и длина колоса, число колосков и зерен в колосе, число зерен в колоске, масса зерна с колоса. Рассчитывали массу 1000 зерен в колосе и коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза ($K_{хоз.}$) колоса. Качество сена определяли в 2015-2017 годах в Агрохимцентре «Омский» в соответствии с ГОСТ Р 55452-2013 (М., 2014) по следующим показателям: содержание сырого и переваримого протеина, клетчатки, кормовых единиц, обменной энергии, кальция, фосфора, каротина и сахаров.

В опыте 2 (2017-2019 годы) анализ урожайности зерна и вегетативной массы пырея сизого проводили в питомнике, заложенном 15 августа 2016 года. Посев ручной, площадь делянки — 5 м^2, расстояние между рядками — 40 см, между растениями — 10 см, глубина посева семян — 2 см, повторность 3-кратная. Предшественник — чистый пар. Уборку проводили вручную, сноповой материал взвешивали. При доведении влажности снопов до воздушно-сухого состояния их обмолачивали на сноповой молотилке МПСУ-1 («Омский экспериментальный завод», Россия) и взвешивали зерно. Урожайность зерна приводили к 14 % влажности. Также в этом опыте изучали морфометрические параметры зерновки сорта Сова и яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева (площадь, периметр, длина, ширина и циркулярность). Для анализа использовали сканер EPSON XL 110000 («Seiko Epson Corporation», Япония) и программу Smart grain v. 1.2 (http://www.kazusa.or.jp/phenotyping/smartgrain/installation.html). Качество зерна сорта Сова определяли с помощью прибора Инфралюм ФТ 10 М («Люмэкс», Россия).

В опыте 3 анализировали корреляции между компонентами продуктивности и высотой растений в питомнике размножения пырея сизого сорта Сова, заложенном по паровому предшественнику в мае 2017 года. Площадь посева — 0,2 га, посев сеялкой ССФК-7 («Омский экспериментальный завод», Россия), ширина междурядий — 40 см, глубина посева — 2 см, без повторностей. В 2018-2019 годах были отобраны по 50 высокорослых и 50 низкорослых растений. В лаборатории провели анализ по компонентам главного колоса и растения.

В 2018-2019 годах растения сорта Сова выкапывали лопатой на глубину штыка в фазу цветения (всего по 5 растений без повторений). Корни озимой пшеницы сорта Омская 4 и яровой Элемент 22 выкапывали в фазу цветения. Корни отмывали от земли и с использованием сканера EPSON XL110000 («Epson America, Inc.», США) и программы WinRHIZO 2016 Pro («Regent Instruments, Inc.», Канада) оценивали их длину, ширину, средний диаметр, объем, основную площадь, число корневых кончиков, суммарную длину.

Посев сортов озимой и яровой пшеницы проводили на том же поле, где размещался опыт 3. Предшественник — чистый пар, норма высева — 500 всхожих зерен на 1 м^2, повторность 3-кратная. Срок сева озимой пшеницы — 20 августа 2017 и 2018 годов, яровой пшеницы — 20 мая 2018 и 2019 годов.

В опыте 4 оценку биологической активности ризосферы пырея сизого Сова в сравнении с озимой пшеницей Омская 4 и яровой мягкой пшеницей Элемент 22 проводили в 2019 году на опытном поле Омского ГАУ. В фазу кущения, после перезимовки (22 мая) и в фазу колошения (19 июня) отбирали пробы почвы для учета микроорганизмов. Использовали мясопептонный агар (МПА) для учета общего числа бактерий-сапрофитов, включая аммонификаторов; крахмал-аммиачный агар (КАА) для определения численность микроорганизмов, потребляющих минеральный азот (NH_3), в том числе актиномицетов; среду Чапека для грибов; среду Мишустина для олигонитрофилов; среду Муромцева-Герретсена для бактерий, мобилизующих минеральные фосфаты; среду Гетчинсона для целлюлозоразрушающих микроорганизмов; выщелоченный агар с добавлением аммонийно-магниевой соли фосфорной кислоты для нитрификаторов. Количество нитратного азота определяли дисульфофеноловым методом по Грандваль-Ляжу. Для оценки биологической активности почвы использовали целлюлозный тест. Целлюлозные пленки были заложены на глубину 0-20 см в 4-кратной повторности для каждой культуры. Биологическую активность ризосферы и почвы определяли по общепринятым методикам (23-25), повторность 3-кратная.

Статистическая обработка экспериментальных данных включала определение средних значений (*M*), стандартных ошибок средних (±SEM), корреляционный анализ. Достоверность различий оценивали по наименьшей существенной разности при уровне значимости 5 % ($НСР_{05}$) по общепринятой методике (26) с использованием пакета прикладных статистических программ Microsoft Excel. Двухфакторный дисперсионный анализ проводили в программе STATISTICA v. 6.0 («StatSoft, Inc.», США).

Результаты. Продуктивность колоса — один из основных элементов структуры урожая. Средняя масса 1000 зерен у нового сорта пырея сизого Сова составляла 9,7 г. Следует отметить, что сорт Сова имел относительно высокие показатели по признакам число зерен в колосе и $К_{хоз.}$ колоса (табл. 1).

1. Компоненты продуктивности у пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова (*M*±SEM; опыт 1, опытное поле Омского ГАУ, 2016-2017 годы)

Показатель	2016 год	2017 год	Среднее по годам
Масса колоса, г	0,79±0,19	0,97±0,23	0,88±0,21
Длина колоса, см	18,2±2,3	19,8±2,5	19,0±2,4
Число колосков в колосе, шт.	18,3±2,7	21,0±3,1	19,6±2,9
Число зерен в колосе, шт.	41,3±13,3	60,0±19,2	50,6±16,5
Число зерен в колоске, шт.	2,3±0,7	2,9±0,9	2,6±0,8
Масса зерна колоса, г	0,4±0,1	0,5±0,1	0,4±0,1
Масса 1000 зерен, г	10,4±1,5	9,0±1,3	9,7±1,4
$К_{хоз.}$ колоса, %	50,6±7,0	51,5±8,0	51,0±7,5

Примечание. $К_{хоз.}$ — коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза. Описание опыта см. в разделе «Методика».

Результаты селекционного улучшения пырея сизого в значительной степени зависят от эффективности отбора, в связи с чем был проведен анализ сопряженности признаков растений. Мы выявили среднюю взаимосвязь массы 1000 зерен с высотой стебля и длиной колоса (r = –0,3; p = 0,05) (рис. 1). Была отмечена отрицательная корреляция между массой 1000 зерен и числом колосков (r = –0,5, p = 0,01), а также числом зерен в колосе (r = –0,5; p = 0,01). Вероятно, отбор более короткостебельных клонов, особенно с меньшим числом колосков в главном колосе и, соответственно, меньшим числом зерен, целесообразен для дальнейшего увеличения массы 1000 зерен.

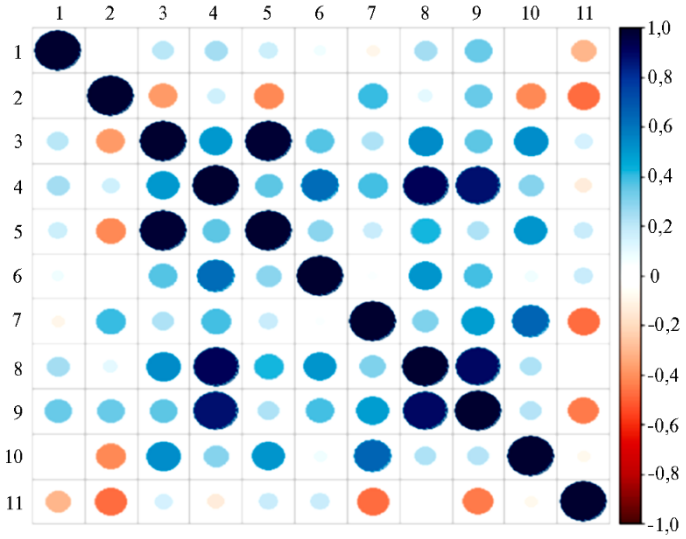

Рис. 1. Корреляция (*r*) между признаками пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова: 1 — высота растения, 2 — длина колоса, 3 — масса растения, 4 — масса колоса, 5 — масса стебля, 6 — ширина колоса, 7 — число колосков в колосе, 8 — масса зерна в колосе, 9 — число зерен в колосе, 10 — плотность колоса, 11 — масса 1000 зерен. Критическое значение *r* при уровнях значимости p = 0,05 и p = 0,01 равно соответственно 0,27 и 0,39 (опыт 3, опытное поле Омского ГАУ, 2018-2019 годы). Описание опыта см. в разделе «Методика».

При сравнении зерна пырея сизого сорта Сова и яровой мягкой пшеницы сорта Памяти Азиева было установлено, что пырей характеризовался длинной, но мелкой, не выполненной зерновкой, о чем свидетельствовали сниженные показатели площади и циркулярности (табл. 2, рис. 2).

2. Параметры зерновки у пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова и яровой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Памяти Азиева (*M*±SEM; опыт 2, опытное поле Омского ГАУ)

Параметр	Сова			Памяти Азиева			НСР05
	2017 год	2018 год	2019 год	2017 год	2018 год	2019 год	
Площадь, мм^2	9,28±1,45	9,25±1,45	9,03±1,41	15,98±2,50	15,11±2,36	14,48±2,26	1,1
Периметр, мм	16,34±1,67	16,87±1,72	15,91±1,63	16,82±1,72	15,83±1,62	14,23±1,46	1,3
Длина, мм	7,02±0,67	7,35±0,71	6,83±0,66	6,47±0,62	6,21±0,59	6,45±0,62	0,55
Циркулярность	0,44±0,05	0,46±0,05	0,46±0,05	0,72±0,08	0,72±0,08	0,70±0,07	0,25
Ширина, мм	1,68±0,25	1,72±0,25	1,67±0,24	3,29±0,48	3,30±0,48	3,00±0,44	0,81

Примечание. Описание опыта см. в разделе «Методика».

Рис. 2. Зерно яровой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. Памяти Азиева (А) **и пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова** (Б) (опытное поле Омского ГАУ).

У сорта Сова двойное назначение использования — на зерно и на зеленый корм, сено. Урожайность его зерна, зеленой массы и сена в течение 3 лет возрастала (табл. 3). Содержание белка и клейковины в зерне у нового сорта оказалось очень высоким. Интересен тот факт, что на третий год репродуцирования количество белка

увеличилось на 2 %. Наибольшее содержание сырой клейковины было отмечено в 2018 году (см. табл. 3).

3. Урожайность и качество зерна у пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова (*M*±SEM; опыт 2, опытное поле Омского ГАУ)

Год	Урожайность, ц/га			Белок, %	Клейковина, %
	зерно	зеленая масса	сено		
2017	8,3±2,1	187,1±48,8	63,0±15,3	18,5±2,0	35,6±4,1
2018	9,0±2,3	219,0±53,2	73,0±18,6	19,1±2,4	37,2±4,3
2019	10,4±2,7	224,8±54,3	76,4±18,8	20,5±2,2	36,0±4,4
В среднем	9,2±2,4	210,3±51,2	71,0±17,8	19,4±2,3	36,3±4,2
$НСР_{05}$	1,2	13,8	5,0	1,3	1,1

Примечание. Описание опыта см. в разделе «Методика».

В целом качество сена вполне соответствовало требуемому для использования на корм крупного рогатого скота. Лучшие показатели качества отмечали в 2015 году, когда растения не колосились и их убирали только на сено в опыте 1. В 2016-2017 годах качество сена определяли в опыте 1 уже после обмолота зерна (табл. 4).

Многолетний период существования и хорошо развитая корневая система пырея сизого существенно повышают эффективность использования запасов влаги в почве. Пырей сизый сорта Сова в верхнем слое почвы имел более развитую корневую систему в сравнении с пшеницей (табл. 5). При максимально возможной ширине и длине корневой системы 25×25 см (длина сторон и глубина куба почвы с корнями для отмывки), у пырея сизого в 2018 году она составила 23,4×24,7 см, у озимой пшеницы Омская 4 — 8,0×11,6 см, у яровой пшеницы Элемент 22 — 7,2×10,7 см. Средняя площадь поверхности главных корней у пырея сизого была больше, чем у озимой (в 7,9 раза, $p \leq 0,05$) и яровой пшеницы (в 8,4 раза, $p \leq 0,05$), площадь поверхности всех корней — больше соответственно в 8,0 ($p \leq 0,05$) и в 8,4 раза ($p \leq 0,05$), средний диаметр корней — на 0,3 и 0,1 мм, объем корней — в 7,8 и 6,2 раза ($p \leq 0,05$), длина всех корней — в 6,9 и 9,8 раза ($p \leq 0,05$), среднее число кончиков корней — в 3,7 и 4,6 раза (см. табл. 5). В 2019 году аналогичные различия между культурами сохранялись. Следовательно, пырей сизый сорта Сова по всем показателям корневой системы существенно превосходит и яровую, и озимую пшеницу.

Общее суммарное количество определяемых групп агрономически полезных микроорганизмов в ризосфере пырея сизого Сова превышало их численность в ризосфере озимой пшеницы Омская 4 на 201,4 млн КОЕ/г, или в 2,1 раза ($p \leq 0,05$). При этом в той или иной степени увеличилось количество микроорганизмов в каждой из определяемых групп, в наибольшей степени — численность олигонитрофилов и бактерий, мобилизирующих минеральные фосфаты (соответственно на 114,3 и 63,1 млн КОЕ/г). Особенно значительный рост численности этих микробов (до 328 и 210 млн КОЕ/г) наблюдался в период кущения пырея сизого в мае, когда в почве было еще достаточно влаги (более 20 %). Олигонитрофилы — микроорганизмы, способные выживать в условиях недостатка почвенного азота, но при этом фиксировать азот атмосферы (27). Фосфатмобилизирующие микроорганизмы, выделенные на среде Муромцева-Герретсена, осуществляют трансформацию труднодоступных для растений минеральных соединений фосфора в почве, что улучшает режим фосфорного питания растений. Можно предположить, что состав корневых выделений пырея третьего года репродуцирования более благоприятен для роста и жизнедеятельности этих микроорганизмов, чем у озимой пшеницы (табл. 6).

4. Качество сена у пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова (*M*±SEM; опыт 1, опытное поле Омского ГАУ)

Год	Химический состав корма, %		Кормовые единицы, сухое вещество	Обменная энергия, МДж/кг	Переваримый протеин, г/кг	Ca, г/кг	P, г/кг	Каротин, мг/кг	Сахар, г/кг
	протеин	клетчатка							
2015	14,30±2,11	21,50±1,96	0,55±0,04	8,55±0,51	95,7±20,3	3,08±0,43	2,20±0,31	53,00±6,11	215,40±3,41
2016	5,93±0,72	31,50±3,21	0,49±0,03	7,62±0,47	39,7±9,3	3,83±0,52	1,64±0,26	18,00±3,24	38,30±3,93
2017	9,39±1,56	28,10±3,02	0,52±0,03	8,44±0,52	62,9±14,2	4,32±0,63	1,78±0,27	28,00±4,49	70,40±6,78
$НСР_{05}$	6,42	8,57	0,08	0,96	33,3	1,05	0,53	24,0	131,1

Примечание. Описание опыта см. в разделе «Методика».

5. Характеристика корневой системы пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова, озимой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Омская 4 и яровой мягкой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Элемент 22 (*M*±SEM; опыт 3, опытное поле Омского ГАУ)

Показатель	Пырей сизый сорта Сова		Озимая пшеница сорта Омская 4		Яровая пшеница сорта Элемент 22		$НСР_{05}$
	2018 год	2019 год	2018 год	2019 год	2018 год	2019 год	
Ширина корней, см	23,4±2,3	25,1±0,7	8,0±1,0	8,6±1,2	7,2±0,7	8,6±0,7	8,79
Длина корней, см	24,7±2,2	26,2±0,6	11,6±1,5	12,2±1,5	10,7±0,9	11,6±0,8	7,58
Площадь главных корней, $см^2$	58,3±9,0	57,9±7,2	7,4±2,3	7,6±1,9	6,9±2,1	6,1±1,5	27,70
Суммарная площадь, $см^2$	183,2±28,4	181,9±22,7	23,1±7,1	22,8±6,8	21,7±4,7	19,2±4,7	87,18
Средний диаметр, мм	0,90±0,10	0,70±0,05	0,06±0,09	0,58±0,08	0,80±0,06	0,60±0,07	0,31
Объем корней, $см^3$	3,10±0,70	3,21±0,70	0,40±0,09	0,41±0,09	0,50±0,09	0,30±0,10	1,49
Суммарная длина корней, см	854,2±42,5	826,3±56,9	124,3±25,5	138,5±30,3	87,4±20,7	96,5±19,0	395,4
Число корневых кончиков, шт.	1643,0±460,0	2099,0±261,0	439,9±129,9	450,3±131,2	355,0±79,2	360,9±76,3	811,6

Примечание. Описание опыта см. в разделе «Методика».

6. Результаты микробиологического анализа (КОЕ/г) **ризосферы пырея сизого *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова и озимой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Омская 4** (*M*±SEM; опыт 4, опытное поле Омского ГАУ, 2019 год)

Группа микроорганизмов	Озимая пшеница сорта Омская 4			Пырей сизый сорта Сова			Среднее значение показателя у сорта Сова по отношению к сорту Омская 4, %	НСР05
	дата отбора проб		среднее	дата отбора проб		среднее		
	22.05	19.06		22.05	19.06			
Бактерии, растущие на МПА, млн	25,0	19,4	22,2±1,8	31,0	26,1	28,6±1,5	+28,8	6,3
Микроорганизмы на КАА, млн	15,1	14,3	14,7±0,3	42,0	22,5	32,3±6,2	+119,7	6,6
Олигонитрофилы, млн	77,0	69,0	73,0±2,5	328,2	46,3	187,3±89,1	+156,5	96,0
Бактерии, мобилизующие фосфаты, млн	84,0	51,1	67,6±10,4	209,8	51,6	130,7±50,0	+93,3	44,1
Грибы, тыс.	38,0	28,5	33,3±3,0	52,8	50,0	51,4±0,9	+54,4	42,5
Целлюлозолитики, тыс.	70,6	27,0	48,8±13,7	87,9	31,7	59,8±17,7	+22,5	42,6
Нитрификаторы, кл.	163,0	220,3	191,7±18,0	131,0	288,6	210,0±49,8	+9,5	161,0
Общее число микроорганизмов, млн	201,4	154,1	177,8±14,0	611,3	146,9	379,2±146,8	+281,4	147,0

Примечание. МПА — мясопептонный агар, КАА — крахмал-аммиачный агар. Описание опыта см. в разделе «Методика».

По мнению А.В. Синдиревой с соавт. (28), численное соотношение разных видов микроорганизмов служит лучшим индикатором условий, чем численность одного вида, поскольку целое лучше отражает общее воздействие, чем часть. По соотношению групп микроорганизмов на КАА и МПА судят об интенсивности минерализации органических азотсодержащих соединений в почве, на МПА и КАА — об интенсивности иммобилизации азота (29). В среднем по предварительным данным минерализация в ризосфере пырея сизого происходила интенсивнее (КАА/МПА = 1,1), в то время как в ризосфере растений озимой пшеницы преобладала иммобилизация азота, аккумуляция его органическими соединениями почвы, о чем свидетельствовало соотношение КАА/МПА = 0,66. Обилие почвенных грибов, а также целлюлозоразлагающих микроорганизмов в ризосфере пырея также было выше, чем под озимой пшеницей, на 11 и 18 тыс. КОЕ/г, или на 22,5 и 54,4 %.

Стимуляция роста численности и развития почвенной микрофлоры в ризосфере пырея, видимо, связана с особенностями корневой системой этой многолетней злаковой культуры. Так, площадь всех корней пырея превышала аналогичный показатель у озимой пшеницы почти в 8,0 раза, а ширина корней — в 2,9 раза (см. табл. 5). Целлюлозный тест, по мнению автора метода Л.Д. Тихомировой (30), характеризует в целом сложившееся эффективное плодородие под культурой. Наиболее высокую активность почвенной микрофлоры мы отмечали под пыреем сизым в сравнении с озимой и яровой пшеницей, о чем свидетельствует интенсивность разложения целлюлозы в слое 0-20 см — соответственно 57,0; 43,3 и 35,6 % (табл. 7).

7. Интенсивность разложения целлюлозы (%) под пыреем сизым *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey сорта Сова, озимой мягкой пшеницей *Triticum aestivum* L. сорта Омская 4 и яровой мягкой пшеницей *T. aestivum* L. сорта Элемент 22 (*M*±SEM; опыт 4, опытное поле Омского ГАУ, 2019 год)

Культура (вариант А)	Слой почвы (вариант В)			
	0-10 см	10-20 см	0-20 см	min-max
Озимая пшеница сорта Омская 4	49,8±4,9	36,7±5,2	43,3±4,1	33,8-59,1
Пырей сизый сорта Сова	60,9±2,9	53,2±6,6	57,0±2,4	47,2-66,2
Яровая пшеница сорта Элемент 22	34,0±1,2	37,2±4,8	35,6±1,0	31,5-41,4

Примечание. $НСР_{05}$ в вариантах: А = 11,0; В = 6,9; АВ =15,5. Описание опыта см. в разделе «Методика».

В дополнение к традиционной селекции направление по окультуриванию диких сородичей пшеницы, таких как *Thinopyrum intermedium*, несомненно, перспективно для сельского хозяйства, которое должно быть регенеративным, устойчивым к изменению климата. Еще в 1980-е годы W. Jackson (31) предположил, что максимальные устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур могут быть получены за счет развития многолетних зерновых культур. На основе материала, полученного в The Land Institute, и дополнительных циклов отбора на зимостойкость с последующим направленным переопылением выделенных клонов нами был создан адаптированный для России сорт Сова. Для сельского хозяйства России сорт Сова — это первый крупнозерный сорт пырея сизого с массой 1000 зерен 9,0-10,4 г (см. табл. 1). Несмотря на то, что по массе 1000 зерен сорт Сова значительно уступает яровой и озимой пшенице, его зерно может быть включено в производство хлебобулочных и кондитерских изделий, о чем свидетельствует опыт использования аналогичного сорта пырея сизого Kernza в США (1). Дальнейшее увеличение массы 1000 зерен — одна из основных задач селекции пырея сизого. Учитывая корреляции между признаками колоса (см.

рис. 1), отбор форм с меньшим числом колосков и меньшим числом зерен в главном колосе, вероятно, целесообразен для дальнейшего увеличения массы 1000 зерен. Средняя достоверная отрицательная корреляция между высотой растения и массой 1000 зерен ($r = -0,3$; $p = 0,05$) имеет положительное значение для отбора зерновых форм, поскольку более высокорослые популяции в большей степени склонны к полеганию.

В исследованиях института The Land Institute в четвертом цикле отбора в популяции пырея сизого масса зерновки имела высокую наследуемость ($h^2 = 0,68$), но этот признак был изучен у растений с наибольшей массой зерна колоса (32). Длина зерновки у сорта Сова соответствовала показателю для зерновки мягкой пшеницы, однако циркулярность, свидетельствующая о выполненности зерновки, была существенно меньше, чем у сорта пшеницы Памяти Азиева (см. табл. 2). Отбор на увеличение показателя циркулярности, тесно связанного с натурой зерна, для пырея сизого может иметь определенное значение при селекции на зерновое использование. Урожайность зерна многолетнего злака ниже, чем у однолетних культур, потому что часть энергии расходуется на развитие корневой системы и отрастание после перезимовки. Однако, поскольку затраты на производство зерна ниже, можно получать чистую прибыль, несмотря на невысокую урожайность пырея в сравнении с зерновыми однолетними культурами, о чем свидетельствует опыт американских исследователей (33). Можно безубыточно возделывать пырей в течение четырех-шести лет, при этом соответствующая агротехника и минеральные подкормки в весенний период повысят урожайность культуры.

Содержание белка в зерне сорта Сова было высоким (см. табл. 3). Количество белка в зерне пырея сизого значительное, но содержание высокомолекулярных субъединиц глютенина, обусловливающих высокое хлебопекарное качество, меньше, чем у мягкой пшеницы. Также указывается на более высокое общее содержание пищевых волокон в муке пырея сизого (16,4 %), чем в пшеничной цельнозерновой (11,0 %) (34). Определенное количество пищевых волокон в рационе человека может быть полезным для контроля содержания глюкозы в крови после приема пищи. В муке пырея сизого грубого помола имеется значительное количество пищевых волокон и антиоксидантов (19, 34). Установлено, что для большей части популяций пырея сизого характерна более высокая антиоксидантная активность в зерне по сравнению с пшеницей (21).

Возрастающая эрозия — наиболее распространенный процесс деградации почвы во всем мире. Эрозия почв приводит к снижению их плодородия, загрязнению принимающих водоемов вниз по течению и увеличению выбросов парниковых газов (35, 36). Корневая система сорта Сова значительно превосходит таковую у яровой и озимой пшеницы, что благоприятно сказывается на биологической роли этого сорта в повышении плодородия и снижении негативных эрозийных процессов в почве (см. табл. 5).

Микроорганизмы играют важную роль в основных почвенных процессах, определяющих условия корневого питания растений. Интенсивность и направленность микробиологических процессов способствуют лучшему использованию растениями минеральных и органических соединений (37). Каждый вид и сорт характеризуется специфическими корневыми выделениями, в которых присутствуют органические соединения, обладающие физиологической активностью, — ферменты, витамины, ростовые вещества и т.д. (38). Поэтому в зоне корня размножается обильная сапрофитная микрофлора в количестве более значительном, чем в массе почвы.

На основании проведенных исследований установлено, что в ризосфере пырея сизого сорта Сова складывались более благоприятные условия для развития агрономически важных групп микроорганизмов в сравнении с озимой пшеницей сорта Омская 4. Их суммарная численность превышала соответствующий показатель у озимой культуры в 2,2 раза. Интенсивность процесса минерализации (КАА/МПА) была выше на 58 %, интенсивность разложения целлюлозы — соответственно на 13,7 и 21,4 %, чем у сортов озимой и яровой пшеницы (см. табл. 6, 7). Полученные результаты согласуются с сообщениями других научных групп (39-41).

В заключении следует отметить, что селекция пырея сизого на улучшение хозяйственно ценных признаков — перспективное направление реализации огромного генетического потенциала этой культуры. Расширение площадей возделывания многолетних культур будет способствовать рациональному использованию природных ресурсов, улучшит фитоклимат, сбалансирует рацион питания населения и в целом будет способствовать улучшению экологической обстановки, аккумулированию углекислого газа в почве и снижению негативного действия парникового эффекта. В настоящее время основной метод селекции пырея сизого — отбор по хозяйственно ценным признакам, однако в ближайшей перспективе эффективность отбора с использованием молекулярных маркеров может стать существенно выше. Мы ожидаем, что с помощью маркирования будет ускорен селекционный прогресс. Использование результатов этой селекционной программы, а также вовлечение новых инструментов селекции позволит повысить урожайность пырея сизого и улучшить его агрономические признаки.

Таким образом, урожайность зерна, зеленой массы и сена крупнозерного сорта пырея сизого Сова в течение трех лет репродукции возрастала с каждым годом и в среднем составила соответственно 9,2; 210,3 и 71,0 ц/га. Показатели качества зерна у нового сорта были высокими — 19,4 % белка и 36,3 % клейковины. Число зерен в колосе в среднем составляло более 50 шт., масса 1000 зерен — 9,7 г, $K_{хоз.}$ колоса — 51 %. Длина корней у сорта Сова в 6,9-9,8 раза больше, а площадь поверхности всех корней — в 8,0 раза больше, чем у озимой и яровой мягкой пшеницы. Суммарная численность агрономически важных групп микроорганизмов в ризосфере сорта Сова оказалась выше в 2,2 раза, интенсивность процесса минерализации (соотношение численности микроорганизмов на КАА и МПА) — на 58 % по сравнению с озимой пшеницей сорта Омская 4. Интенсивность разложения целлюлозы была на 13,7 и 21,4 % выше, чем у сортов озимой и яровой пшеницы. Изучение корреляционных связей между массой 1000 зерен, высотой растения и признаками продуктивности выявило целесообразность отбора более короткостебельных биотипов с меньшим числом колосков и зерен в главном колосе для дальнейшего увеличения крупности зерновки. Сорт Сова включен в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, и рекомендован для возделывания в регионах России в течение четырех-шести лет на кормовые и зерновые цели.

[1]ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,
644008 Россия, г. Омск, Институтская пл., 1,
e-mail: vp.shamanin@omgau.org, an.aydarov35.06.01@omgau.org, sergeyschepelew@mail.ru, as.chursin@omgau.org, iv.pototskaya@omgau.org ✉;
[2]ФГБНУ Омский аграрный научный центр,
644012 Россия, г. Омск, пр. Королева, 26,
e-mail: olkhaa48@mail.ru;
[3]The Land Institute,
2440 E. Water Well Rd., Salina, KS 67401, USA,
e-mail: dehaan@landinstitute.org

Поступила в редакцию 20 августа 2020 года

LARGE-GRAINED WHEATGRASS VARIETY SOVA (*Thinopyrum intermedium*) AS AN ALTERNATIVE TO PERENNIAL WHEAT

V.P. Shamanin[1], A.I. Morgounov[1], A.N. Aydarov[1], S.S. Shepelev[1], A.S. Chursin[1], I.V. Pototskaya[1] ✉, O.F. Khamova[2], L.R. DeHaan[3]

[1]*Stolypin Omsk State Agrarian University,* 1, Institutskaya pl., Omsk, 644008 Russia, e-mail vp.shamanin@omgau.org, an.aydarov35.06.01@omgau.org, sergeyschepelew@mail.ru, as.chursin@omgau.org, iv.pototskaya@omgau.org (corresponding author ✉);
[2]*Omsk Agrarian Scientific Center,* 26, Korolev pr., Omsk, 644012 Russia, e-mail olkhaa48@mail.ru;
[3]*The Land Institute,* 2440 E. Water Well Rd., Salina, KS 67401, USA, e-mail dehaan@landinstitute.org
ORCID:
Shamanin V.P. orcid.org/0000-0003-4767-9957
Morgounov A.I. orcid.org/0000-0001-7082-5655
Aydarov A. orcid.org/0000-0003-1031-3417
Shepelev S.S. orcid.org/0000-0002-4282-8725
Chursin A.S. orcid.org/0000-0001-6797-6145
Pototskaya I.V. orcid.org/0000-0003-3574-2875
Khamova O.F. orcid.org/0000-0002-0236-0304
DeHaan LR. orcid.org/0000-0002-6368-5241
The authors declare no conflict of interests
Acknowledgements: The
Supported financial from the Ministry of Agriculture of the Russian Federation
Received August 20, 2020 doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.450eng

Abstract

For the last decades, due to climate warming, environmental threats, increasing of energy intensity of the grain production, wider usage of perennial cultures as an alternative to annual agricultural cultures, more resistant to negative biotic and abiotic environmental factors has been proposed. The large-grained wheatgrass variety Sova was created at Omsk State Agrarian University via mass selection of wintered biotypes from the population of *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey obtained from The Land Institute (Kansas, USA), with following targeted cross-pollination and creation of new winter-hardy population. In 2020, the variety was registered in the State register of breeding achievements approved for use for all regions of the Russian Federation. For the first time, the biological and economical significance of the large-grained wheatgrass variety Sova as an alternative to perennial wheat is presented in this work. The variety Sova of *Thinopyrum intermedium* is recommended for cultivation as grain and fodder crop during four-six years, the variety forms grain with high protein content and good quality hay. The goal of this research is evaluation of economically valuable traits of new large-grain wheatgrass variety Sova under conditions of southern forest-steppe of Western Siberia, as well as to determine the correlation of spike components with plant height for increasing of the selection efficiency and thousand kernel weight. The research was carried out in the experimental field of Omsk State Agrarian University under conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia in 2015-2019. A new wheatgrass variety Sova (*Thinopyrum intermedium*), winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Omskaya 4, and spring bread wheat (*T. aestivum* L.) cvs. Element 22 and Pamyati Azieva were compared. The spike productivity traits of 100 spikes of wheatgrass, i.e., spike weight and length, number of spikelets and grains per spike, grain weight per spike, etc., were evaluated. The thousand kernel weight and spike harvest index were calculated. The grain yield and biomass were determined. The correlations of productivity components with plant height were analyzed. The grain morphometric parameters of variety Sova and spring bread wheat Pamyati Aziev (area, perimeter, length, width, and circularity) were compared. The grain and hay quality was evaluated. For wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*), winter wheat variety Omskaya 4, and spring variety Element 22, the length, width, average diameter, volume, main area, number of root tips, and total root length were determined. The biological activity of the rhizosphere of *Thinopyrum intermedium* compared to winter wheat variety Omskaya 4, and spring bread wheat variety Element 22 was evaluated. The soil samples for accounting of microorganisms were taken in the shoots phase, after winter survival, and in the heading phase. It was found that grain yield, biomass, and hay of the variety Sova for three years of reproduction increased every year and averaged 9.2, 210.3, and 71.0 centner per hectare, respectively. Grain quality indicators were high, the 19.4 % protein and 36.3 % gluten content. The variety Sova has many grains per spike, on average more than 50, thousand kernel weight is 9.7 g, and spike harvest index is 51 %. The length of all roots of *Thinopyrum intermedium* was 6.9-9.8 times longer compared to that of winter and spring varieties. The total number of agronomically important groups of microorganisms was 2.2 times higher, the intensity of mineralization (abundance of microorganism on starch ammonia agar to meat peptone agar SAA/MPA) was 58 % higher than in winter wheat variety Omskaya 4. The rate of cellulose decomposition was 13.7 and 21.4 % higher than in winter and spring wheat varieties. According to the studying the correlations between thousand kernel weight, plant height, and productivity traits suggest that the selection of biotypes with shorter stem, fewer spikelets and grains per spike is appropriate for grain weight increasing.

Keywords: *Thinopyrum intermedium*, spring wheat, winter wheat, breeding, perennial cultures,

Sova variety, spike, valuable traits, correlations, yield, grain, hay, grain quality, roots, rhizosphere microorganisms.

REFERENCES

1. de Oliveira G., Brunsell N.A., Crews T.E., DeHaan L.R., Vico G. Carbon and water relations in perennial Kernza (*Thinopyrum intermedium*): an overview. *Plant Science*, 2020, 295 (doi: 10.1016/j.plantsci.2019.110279).
2. Glover J.D., Reganold J.P., Bell L.W., Borevitz J., Brummer E.C., Buckler E.S., Cox C.M., Cox T.S., Crews T.E., Culman S.W., DeHaan L.R., Eriksson D., Gill B.S., Holland J., Hu F., Hulke B.S., Ibrahim A.M.H., Jackson W., Jones S.S., Murray S.C., Paterson A.H., Ploschuk E., Sacks E.J., Snapp S., Tao D., Van Tassel D.L., Wade L.J., Wyse D.L., Xu Y. Increased food and ecosystem security via perennial grains. *Science*, 2010, 328(5986): 1638-1639 (doi: 10.1126/science.1188761).
3. DeHaan L.R., Larson S., López-Marqués R.L., Wenkel S., Gao C., Palmgren M. Roadmap for accelerated domestication of an emerging perennial grain crop. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(6): 525-537 (doi: 10.1016/j.tplants.2020.02.004).
4. DeHaan L.R., Ismall B.R. Perennial cereals provide ecosystem benefits. *Cereal Foods World*, 2017, 62(6): 278-281 (doi: 10.1094/CFW-62-6-0278).
5. Tsitsin N.V. *Otdalennaya gibridizatsiya rastenii* [Remote plant hybridization]. Moscow, 1954 (in Russ.).
6. Tsitsin N.V. *Mnogoletnyaya pshenitsa* [Perennial wheat]. Moscow, 1978 (in Russ.).
7. Suneson C., El Sharkawy A., Hall W.E. Progress in 25 years of perennial wheat breeding. *Crop Science*, 1963, 3(5): 437-439 (doi: 10.2135/cropsci1963.0011183X000300050021x).
8. Upelniek V.P., Belov V.I., Ivanova L.P., Dolgova S.P., Demidov A.S. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*, 2012, 16(3): 667-674 (in Russ.).
9. Sibikeev S.N., Voronina S.A., Krupnov V.A. Genetic control for resistance to leaf rust in wheat-*Agropyron* lines: Agro 139 and Agro 58. *Theor. Appl. Genet.*, 1995, 90(5): 618-620 (doi: 10.1007/bf00222124).
10. Sipos T., Halasz E. The role of perennial rye (*Secale cereale* × *S. montanum*) in sustainable agriculture. *Cereal Research Communications*, 2007, 35(2): 1073-1075 (doi: 10.1556/CRC.35.2007.2.227).
11. Mujeeb-Kazi A., Cortes A., Gul A., Farooq M., Majeed F. Ahmad I., Bux H., William M., Rosas V., Delgad R. Production and cytogenetics of a new *Thinopyrum elongatum/Triticum aestivum* hybrid, its amphiploid and backcross derivatives. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, 40(2): 565-579.
12. Salina E.A., Adonina I.G., Badaeva E.D., Kroupin P., Stasyuk A., Leonova I.N., Shishkina A., Divashuk M.G., Starikova E., Khuat T.M.L., Syukov V., Karlov G. A *Thinopyrum intermedium* chromosome in bread wheat cultivars as a source of genes conferring resistance to fungal diseases. *Euphytica*, 2015, 204(1): 91-101 (doi: 10.1007/s10681-014-1344-5).
13. Hayes R.C., Wang S., Newell M.T., Turner K., Larsen J., Gazza L., Anderson J.A., Bell L.W., Cattani D.J., Frels, K., Galassi E., Morgounov A.I., Revell C.K., Thapa D.B., Sacks E.J., Sameri M., Wade L.J., Westerbergh A., Shamanin V., Amanov A., Li G.D. The performance of early-generation perennial winter cereals at 21 sites across four continents. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1124 (doi: 10.3390/su10041124).
14. Hayes R.C., Newell M.T., DeHaan L.R., Murphy K.M., Crane S., Norton M.R., Wade L.J., Newberry M., Fahim M., Jones S.S., Cox T.S., Larkin P.J. Perennial cereal crops: an initial evaluation of wheat derivatives. *Field Crops Research*, 2012, 133: 68-89 (doi: 10.1016/j.fcr.2012.03.014).
15. McFadden E.S., Sears E.R. The origin of *Triticum spelta* and its free-threshing hexaploid relatives. *Journal of Heredity*, 1946, 37(3): 81-89 (doi: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a105590).
16. Harlan J.R., deWit J.M.J. Toward a rational classification of cultivated plants. *Taxon*, 1971, 20(4): 509-517 (doi: 10.2307/1218252).
17. Mujeeb-Kazi A., Hettel G.P. *Utilizing wild grass biodiversity in wheat improvement: 15 years of wide cross research at CIMMYT*. Mexico, 1995.
18. Curtin S.J., Voytas D.F., Stupar R.M. Genome engineering of crops with designer nucleases. *The Plant Genome*, 2012, 5(2): 42-50 (doi: 10.3835/plantgenome2012.06.0008).
19. Becker R., Wagoner P., Hanners G.D., Saunders R.M. Compositional, nutritional and functional-evaluation of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 1991, 15(1): 63-77 (doi: 10.1111/j.1745-4549.1991.tb00154.x).
20. Rahardjo C.R., Gajadeera C.S., Simsek S., Annor G.A., Schoenfuss T.C., Marti A., Ismail B.P. Chemical characterization, functionality, and baking quality of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*). *Journal of Cereal Science*, 2018, 83(4): 266-274 (doi: 10.1016/j.jcs.2018.09.002).
21. Tyl C.E., Ismail B.P. Compositional evaluation of perennial wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) breeding populations. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(3): 660-669 (doi: 10.1111/ijfs.13925).

22. Dick C., Cattani D., Entz M.H. Kernza intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) grain production as influenced by legume intercropping and residue management. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, 98(6): 1376-1379 (doi: 10.1139/cjps-2018-0146).
23. Klupt S.E., Khetagurova F.V., Chastukhin V.Ya., Aristovskaya T.V., Vladimirskaya M.E., Seliber G.L., Norkina S.P., Katanskaya G.A., Lozina-Lozinskii L.K., Skalon I.S., Kashkin P.N., Rumyantseva V.M., Skorodumova A.M., Gollerbakh M.M. *Bol'shoi praktikum po mikrobiologii: uchebnoe posobie* /Pod obshchei redaktsiei G.L. Selibera [Workshop on microbiology: a guide. G.L. Seliber (ed.)]. Moscow, 1962 (in Russ.).
24. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Soil chemical analysis guide]. Moscow, 1970 (in Russ.).
25. Tepper E.Z., Shil'nikova V.K., Perevertseva G.I. *Praktikum po mikrobiologii. 4-e izd., pererab. i dop.* [Workshop on microbiology, 4th ed.]. Moscow, 1993 (in Russ.).
26. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovanii)* [Methods of field trials]. Moscow, 1985 (in Russ.).
27. Klevenskaya I.L. *Oligonitrofil'nye mikroorganizmy pochv Zapadnoi Sibiri* [Oligonitrophilic microorganisms of soils of Western Siberia]. Novosibirsk, 1974 (in Russ.).
28. Sindireva A.V., Bobrenko I.A. *Metody ekologicheskikh issledovanii: uchebnoe posobie* [Environmental research methods: a guide]. Omsk, 2016 (in Russ.).
29. Korobova L.N., Tanatova A.V., Ferapontova S.A., Shindelov A.V. *Nauchno-metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu mikrobiologicheskikh pokazatelei dlya otsenki sostoyaniya pakhotnykh pochv Sibiri* [Scientific and methodological recommendations on the use of microbiological indicators to assess the state of arable soils in Siberia]. Novosibirsk, 2013 (in Russ.).
30. Tikhomirova L.D. *Sposob opredeleniya effektivnogo plodorodiya pochvy. A.s. 338196 (SSSR) M. Kl. A. 01g 7/00. № 1432987/30-15. Zayavl. 10.04.70. Opubl. 15.05.72. Byul. № 16* [Method for determining effective soil fertility. A.s. 338196 (SSSR) M. Kl. A. 01g 7/00. № 1432987/30-15. Appl. 10.04.70. Publ. 15.05.72. Bull. № 16] (in Russ.).
31. Jackson W. *New Roots for Agriculture*. University of Nebraska Press, Lincoln, 1980.
32. DeHaan L., Christians M., Crain J., Poland J. Development and evolution of an intermediate wheatgrass domestication program. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1499 (doi: 10.3390/su10051499).
33. Bell L.W., Byrne F., Ewing M.A., Wade L.J. A preliminary whole-farm economic analysis of perennial wheat in an Australian dryland farming system. *Agricultural Systems*, 2008, 96 (1-3): 166-174 (doi: 10.1016/j.agsy.2007.07.007).
34. Marti A., Bock J.E., Pagani M.A., Ismail B., Seetharaman K. Structural characterization of proteins in wheat flour doughs enriched with intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) flour. *Food Chemistry*, 2016, 194: 994-1002 (doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.082).
35. Hřivna L., Zigmundová V., Burešová I., Maco R., Vyhnánek T., Trojan V. Rheological properties of dough and baking quality of products using coloured wheat. *Plant Soil and Environ.*, 2018, 64(5): 203-208 (doi: 10.17221/62/2018-PSE).
36. Vico G., Brunsell N.A. Tradeoffs between water requirements and yield stability in annual vs. perennial crops. *Advances in Water Resources*, 2017, 112: 189-202 (doi: 10.1016/j.advwatres.2017.12.014).
37. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition — current knowledge and future directions. *Front. Plant Sci.*, 2017, 19(8): 1617 (doi: 10.3389/fpls.2017.01617).
38. Hassan M.K., McInroy J.A., Kloepper J.W. The interaction of Rhizodeposits with plant growth-promoting Rizobacteria in the rizosphere: a review. *Agriculture*, 2019, 9: 142 (doi: 10.3390/agriculture9070142).
39. DuPont S.T., Beniston J., Glover J.D., Hodson A., Culman S.W., Lal R., Ferris H. Root traits and soil properties in harvested perennial grassland, annual, and never-tilled annual wheat. *Plant Soil*, 2014, 381(1-2): 405-420 (doi: 10.1007/s11104-014-2145-2).
40. Duchene O., Celette F., Barreiro A., Dimitrova Martensson L.-M., Freschet G.T., David C. Introducing perennial grain in grain crops rotation: the role of rooting pattern in soil quality management. *Agronomy*, 2020, 10(9): 1254 (doi: 10.3390/agronomy10091254).
41. McKenna T.P., Crews T.E., Kemp L., Sikes B.A. Community structure of soil fungi in a novel perennial crop monoculture, annual agriculture, and native prairie reconstruction. *PLoS ONE*, 2020, 15(1): e0228202 (doi: 10.1371/journal.pone.0228202).