

Технологические свойства зерна и муки у линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) – носителей локусов *Ha* и *Ha-Sp*, определяющих структуру эндосперма

DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-91-98

УДК 633.111.1:575.21

Поступление/Received: 14.10.2020

Принято/Accepted: 01.03.2021



Technological properties of grain and flour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes carrying two loci that determine the endosperm structure

А. В. СИМОНОВ*, Т. А. ПШЕНИЧНИКОВА

A. V. SIMONOV*, T. A. PSHENICHNIKOVA

Федеральный исследовательский центр

Институт цитологии и генетики

Сибирского отделения РАН,

630090 Россия, г. Новосибирск,

пр. Академика Лаврентьева, 10

* ✉ sialexander@bionet.nsc.ru✉ wheatpsh@bionet.nsc.ru

Institute of Cytology and Genetics,

Siberian Branch

of the RAS,

10 Lavrentyeva Ave.,

Novosibirsk 630090, Russia

* ✉ sialexander@bionet.nsc.ru✉ wheatpsh@bionet.nsc.ru

Актуальность. Назначение зерна мягкой пшеницы зависит от свойств эндосперма, определяемых аллелями генов *Pina* и *Pinb* в локусе *Ha* хромосомы 5D. Мучнистый эндосперм обусловлен биосинтезом кодируемых этими генами полноценных белков пуриноидинов. При размоле такое зерно распадается на мелкие крахмальные гранулы, покрытые белками. Мутации, нарушающие синтез или структуру пуриноидинов, обуславливают твердость и стекловидность зерна. Ранее нами был обнаружен новый локус мягкозерности *Ha-Sp*, интрогрессированный в хромосому 5A мягкой пшеницы от диплоидного вида *Aegilops speltoides* Tausch, который также определяет образование мягкой структуры эндосперма. Объединив два активных локуса в одном генотипе, мы создали супермягкозерную линию (SSL). Целью данной работы было верифицировать взаимодействие двух локусов *Ha* и *Ha-Sp* в других генотипах мягкой пшеницы и оценить технологические свойства зерна и муки по сравнению с имеющейся линией SSL.

Материалы и методы. В работе использованы яровые гибриды F_3-F_8 мягкозерных сортов 'Голубка' и 'Лютесценс 62', носителей локуса *Ha*, с интрогрессивной озимой линией 84/98^w, носителем локуса *Ha-Sp*. Зерно с трех полевых вегетаций изучалось по мукомольным показателям и физическим свойствам муки и теста.

Результаты. На ранних этапах отбора ($F_{3,4}$) отмечены семьи с типичными для мягкой пшеницы мукомольными параметрами, а также супермягкозерные с малым размером частиц муки (9–10 мкм) и низкой стекловидностью эндосперма (29–49%). Направленный отбор позволил получить линии, сходные с линией SSL по мукомольным показателям и силе муки.

Выводы. На генетической основе трех яровых сортов впервые получен набор супермягкозерных линий со специальными свойствами зерна и муки. Они могут быть востребованы в производстве как в пищевых, так и в технических целях. Полученные линии нуждаются во всесторонней оценке специалистов-технологов пищевого и непищевого производства.

Ключевые слова: интрогрессия генов, мягкозерность, стекловидность и мучнистость эндосперма, физические свойства муки и теста.

Background. The end-use of the bread wheat grain depends on the endosperm properties determined by the alleles of the *Pina* and *Pinb* genes at the *Ha* locus on chromosome 5D. The mealy (soft) endosperm is generated by the biosynthesis of puroindolines – complete proteins encoded by these genes. When milled, such grain breaks down into small starch granules covered with proteins. Mutations that disrupt the synthesis or structure of puroindolines determine the hardness and vitreousness of the grain. Earlier, we discovered a new locus for grain softness, *Ha-Sp*, introgressed from the diploid species *Aegilops speltoides* Tausch, which also determines the formation of the soft endosperm structure. By combining two active loci in one genotype, we produced a supersoft grain line (SSL). The aim of the present work was to verify the interaction of the two loci *Ha* and *Ha-Sp* in other wheat genotypes and evaluate the technological properties of grain and flour in comparison with the existing SSL line.

Materials and methods. The F_3-F_8 hybrids from crosses of the soft-grain spring cultivars 'Golubka' and 'Lutescens 62', carriers of the *Ha* locus, with the introgressive line 84/98^w, carrier of the *Ha-Sp* locus, were used in the work. Grain from three field seasons was studied according to milling parameters and physical properties of flour and dough.

Results. At the early stages of selection ($F_{3,4}$), the families with milling parameters typical of bread wheat were identified, as well as supersoft-grain families with a small flour particle size (9–10 μm) and low endosperm vitreousness (29–49%). Targeted selection made it possible to obtain lines similar to the SSL line in terms of milling performance and flour strength.

Conclusion. For the first time, a set of supersoft-grain lines with special properties of grain and flour was obtained on the genetic basis of three spring cultivars. They may be in demand for a wide range of end-uses, including both food and nonfood production purposes.

Key words: introgression of genes, grain softness, endosperm vitreousness and mealiness, physical properties of flour and dough.

Введение

Основная изменчивость структуры эндосперма у мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) определяется аллельным состоянием генов *Pina* и *Pinb* в локусе *Ha*, расположенным в хромосоме 5D (Morris, 2002). Продуктами этих генов являются белки пуриноидины, ответственные за связывание крахмала и белков клейковины. Доминантное состояние этих генов определяет биосинтез целых неповрежденных молекул этих белков и образование регулярных белково-крахмальных гранул определенного размера. При этом формируется мучнистый тип эндосперма (Giroux, Morris, 1998). Мутации в генах *Pina* и *Pinb* приводят к синтезу неполноценных молекул пуриноидинов или полной блокировке их синтеза (нуль-аллели) и вследствие этого к неправильной упаковке крахмала в белковый каркас и образованию крупных неоднородных агрегатов в эндосперме. Такой эндосперм имеет высокую степень твердости. В первом случае частицы крахмала при размоле зерна высвобождаются целиком и плохо усваиваются дрожжами при брожении. Во втором случае происходит раскалывание крупных частиц, и крахмал становится легко доступным для дрожжей (Kozmina, 1955). Такие различия по структуре эндосперма зерновки определяют конечное назначение зерна, которое имеет национальные и культурные особенности использования. Для производства разных изделий из муки требуется зерно с разными технологическими свойствами (Refa, 2002). Если для дрожжевого хлебопечения важны высокая твердозерность и стекловидность зерна, то для кондитерских целей, напротив, используется мука мягкозерных сортов пшеницы. Для многих национальных мучных изделий также необходимо зерно с различным уровнем твердозерности.

Ранее нами был обнаружен новый локус *Ha-Sp* мягкозерности, интрогрессированный в хромосому 5A мягкой пшеницы от диплоидного вида *Aegilops speltoides* Tausch (Pshenichnikova et al., 2010). Этот локус, подобно доминантному локусу *Ha*, определяет образование зерновок пшеницы с мягкой структурой эндосперма. Путем гибридизации линии, содержащей интрогрессию этого гена, с сортом 'Chinese Spring' (CS), который несет доминантный аллель гена *Ha* в хромосоме 5D и является мягкозерным, нам удалось впервые получить линию пшеницы, несущую два гена мягкозерности эндосперма. Взаимодействие этих генов выражалось в формировании зерна с уникальными мукомольными характеристиками (Simonov et al., 2017). Зерно полученной линии при размоле давало очень маленький размер частиц муки и стекловидность менее 50%. Недавно индийские ученые сообщили о введении в пшеницу гена мягкозерности от вида *Ae. triuncialis* L. Этот ген также приводил к образованию мучнистого эндосперма (Sharma et al., 2020). Комбинация таких генов может давать сорта с самой разнообразной структурой эндосперма и различными свойствами муки.

Цель данной работы – верифицировать взаимодействие двух генов *Ha-Sp* и *Ha* в других генотипах мягкой пшеницы и сравнить их эффект на технологические свойства зерна и муки с характеристиками уже имеющейся супермягкозерной линии.

Материалы и методы

Генетический материал. Объектом исследований были яровые гибриды F_3 - F_8 мягкозерных сортов 'Голубка' и 'Лютесценс 62' с интрогрессивной озимой ли-

нией 84/98^w из коллекции «Арсенал». Сорта 'Голубка' и 'Лютесценс 62' относятся к сортам стародавней селекции и имеют мягкий мучнистый эндосперм зерновки. Интрогрессивная линия 84/98^w создана путем индивидуального отбора из F_2M_2 - F_4M_4 асимметричных половых гибридов F_1M_1 ($2n = 49$) популяции Родина × *Ae. speltoides* (Lapochkina, Yatchevskaya, 1997). Данная линия унаследовала от этого вида локус мягкозерности *Ha-Sp* (Pshenichnikova et al., 2010). Отбор в каждом поколении проводился на наименьшую стекловидность с периодическим контролем размера частиц муки при размоле. Для сравнения технологических параметров использовали супермягкозерную гибридную линию SSL (supersoft line), несущую два локуса мягкозерности *Ha* и *Ha-Sp* (Simonov et al., 2017).

Условия выращивания. Зерно для анализа технологических свойств получали при яровом посеве на экспериментальном поле Института цитологии и генетики СО РАН (микрорайон Академгородок, Новосибирская область) в 2016–2018 гг. Посев проводили по пару на участках метровой ширины с расстоянием между рядками 15 см, по 5–10 рядков. Осуществлялся механизированный и ручной уход за растениями – рыхление, опрыскивание инсектицидами, гербицидами и фунгицидами по необходимости. Уборка производилась снопами в фазе «восковая – полная спелость» с последующим дозариванием зерна в снопах.

Анализ технологических свойств зерна. Общую стекловидность зерна определяли визуально после разрезания ста зерновок пополам. Под показателем общей стекловидности понимают сумму полностью стекловидных и половины количества частично стекловидных зерен (ГОСТ 10987-76..., 2001).

Средний диаметр частиц муки (ДЧМ), характеризующий твердозерность, определяли на приборе ПСХ-4 с помощью ранее описанной методики (Shibaev et al., 1974). Физические свойства теста яровых форм определяли на альвеографе из 50 г муки 70-процентного выхода и включали определение силы муки (*W*, единиц альвеографа – е.а.), упругости теста (*P*, мм), растяжимости теста (*L*, мм). Сбалансированность теста рассчитывалась как отношение упругости к растяжимости (*P/L*). Эти показатели не изучали у озимой линии 84/98^w, так как она не морозостойкая в условиях Западной Сибири, а также у сорта CS, который слишком позднеспелый. Содержание белка определяли косвенным способом без размола зерна по инфракрасным спектрам на приборе OmegaAnalyserG.

Содержание сырой клейковины в зерне определяли путем отмывания вручную в воде из двух граммов шрота (ГОСТ Р 54478-2011..., 2012). Количество сырой клейковины выражали в процентах от веса шрота.

Цифровые значения всех технологических показателей представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты и обсуждение

Ранее на основе гибрида между сортом 'Chinese Spring' и линией 84/98^w мы получили линию SSL с мукомольными характеристиками, не свойственными мягкой пшенице (Simonov et al., 2017). Эта линия имела зерно со стекловидностью от 16 до 43%, диаметром частиц муки около 10 мкм и была названа супермягкозерной. Эти свойства обусловлены аддитивным действием двух доминантных генов мягкозерности эндосперма. Чтобы подтвердить универсальность эффекта этих генов мы изучили гибриды с двумя другими мягкозерными сорта-

Таблица 1. Мукомольные параметры и содержание клейковины и белка в зерне
Table 1. Milling parameters, gluten and protein content in grain

Сорта и гибриды / Cultivars and hybrids	Стекловидность, % / Vitreousness, %	ДЧМ*, мкм / PS*, μm	Содержание клейковины, % / Gluten content, %	Содержание белка, % / Protein content, %
Голубка / Golubka	49,7 ± 2,9	9,9 ± 0,1	35,75 ± 3,17	18,64 ± 1,39
Лютеценс 62 Lutescens 62	51,0 ± 4,3	10,6 ± 0,5	37,02 ± 4,48	18,54 ± 1,83
F ₆₋₈ Голубка × 84/98 ^w / F ₆₋₈ Golubka × 84/98 ^w	28,7** ± 10,3	9,81 ± 0,8	35,43 ± 0,96	16,55 ± 2,15
Семья 1 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 1 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	63,5	12,3	34,5	17,0
Семья 2 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 2 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	55,0	11,8	39,5	19,4
Семья 3 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 3 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	73,5	17,9	33,5	17,7
Семья 4 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 4 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	49,0	10,0	36,75	17,5
SSL	43,8 ± 2,4	9,55* ± 2,4	30,25 ± 3,38	14,7 ± 1,24
84/98 ^w	50,25 ± 0,25	13,05 ± 1,45	48,30 ± 1,30	-

Примечание: *ДЧМ – диаметр частиц муки

** Достоверно при P < 0,01 по сравнению с обеими родительскими формами

Note: * PS – flour particle size

*** Significant at P < 0,01, compared with both parent forms

Таблица 2. Физические свойства муки и теста у родительских сортов и супермягкозерных гибридов
 Table 2. Physical properties of flour and dough in the parent cultivars and supersoft-grain hybrids

Сорта и гибриды / Cultivars and hybrids	Сила муки W (е.а.) / Flour strength W (u.a.)	Упругость P (мм) / Elasticity P (mm)	Растяжимость L (мм) / Extensibility L (mm)	Отношение P/L / P/L ratio
Голубка / Golubka	69,7 ± 1,15	41,7 ± 2,35	50,9 ± 4,90	0,8 ± 0,125
Лютеценс 62 / Lutescens 62	56,3 ± 17,80	51,6 ± 11,40	32,2 ± 3,85	1,6 ± 0,165
F ₆₋₈ Голубка × 84/98 ^w / F ₆₋₈ Golubka × 84/98 ^w	71,5	33,0	88,0	0,4
Семья 2 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 2 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	39,6	44,0	13,0	3,38
Семья 3 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 3 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	188,4	124,6	45,8	2,72
Семья 4 F _{3,4} Лютеценс 62 × 84/98 ^w / Family 4 F _{3,4} Lutescens 62 × 84/98 ^w	128,1	70,7	57,0	1,24
SSL	74,9 ± 9,9	62,6 ± 8,4	28,5 ± 5,35	2,3 ± 0,635

ми, 'Лютесценс 62' и 'Голубка', где первый из родителей является носителем гена *Ha* в хромосоме 5D, а второй – гена *Ha-Sp* в хромосоме 5A. В раннем потомстве гибридов среди семей F_{3:4} Лютесценс 62 × 84/98^w происходило расщепление по этим генам, которое выражалось в различиях по мукомольным характеристикам (рис. 1, табл. 1). Родительские формы, содержащие по одному гену мягкозерности, не отличались друг от друга по стекловидности, а у сорта 'Лютесценс 62' диаметр частиц был на 4 мкм меньше, чем у линии 84/98^w. Такие показатели характерны для мягкозерных сортов *Triticum aestivum*. Среди потомства F_{3:4} появлялись семьи с такими же, как у родителей, диаметром частиц муки (около 12,0 мкм) и стекловидностью (55–65%) (см. рис. 1, семьи 1 и 2). Эти семьи, вероятно, были носителями одного из двух генов мягко-

зерности. Появлялись также семьи с высокими мукомольными показателями, не характерными для родителей. Диаметр частиц у них был около 18 мкм, а стекловидность – более 70% (см. рис. 1, семья 3). Такие показатели характерны для носителей рецессивных аллелей генов мягкозерности, которые выщеплялись при дигенном наследовании признака в этом скрещивании. В потомстве гибридов также появлялись семьи, подобные семье 4, с пониженной стекловидностью и с малыми размерами частиц муки (10,0 мкм). Именно такие свойства демонстрировала линия SSL, полученная отбором на малый диаметр частиц муки и низкую стекловидность у растений в течение 10 поколений (рис. 2) (Simonov et al., 2017). Семья 4 стала родоначальницей линии, несущей два гена мягкозерности эндосперма, *Ha* и *Ha-Sp*.

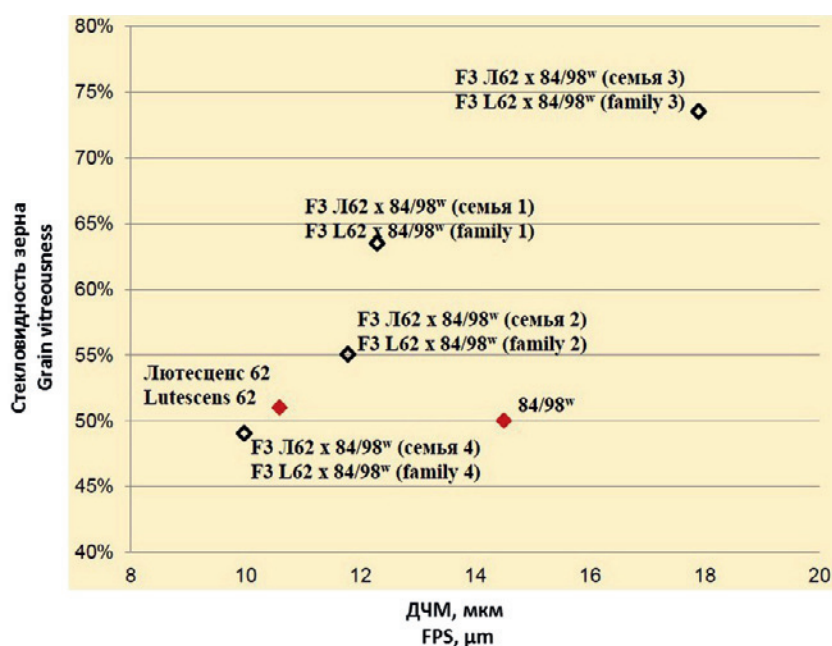


Рис. 1. Распределение семей F_{3:4} от скрещивания Лютесценс 62 × 84/98^w по мукомольным параметрам – общей стекловидности зерна и размеру частиц муки (Л62 – 'Лютесценс 62')

Fig. 1. Distribution of the F_{3:4} families from crossing Lutescens 62 × 84/98^w by milling parameters – total vitreousness of grain and flour particle size (L62 – 'Lutescens 62')

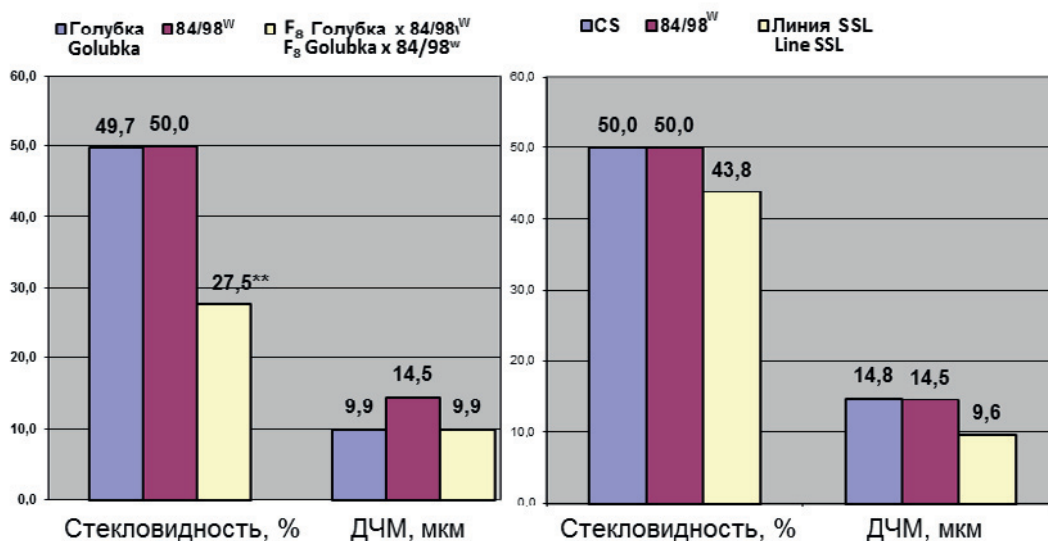


Рис. 2. Мукомольные показатели линий мягкой пшеницы – носителей двух генов мягкозерности *Ha* и *Ha-Sp*

Fig. 2. Milling parameters of bread wheat lines – carriers of the two genes for grain softness, *Ha* and *Ha-Sp*

В другой гибридной комбинации родительский сорт 'Голубка' имел малый размер частиц муки (см. рис. 2). Однако стекловидность зерна его была одинаковой с линией 84/98^w (см. табл. 1). После ряда последовательных отборов в поколениях генотипов с наименьшими показателями мукомольных характеристик была получена линия с необычно низкой стекловидностью (см. рис. 2). По величине стекловидности эта линия достоверно отличалась от родительских форм, при этом таких значений этого признака не было обнаружено у других изученных генотипов (сортов и гибридов). Таким образом, взаимодействие двух генов мягкозерности в разных генотипических средах также выражалось в образовании различных по стекловидности эндоспермов. Это, как нам кажется, связано с тем, что диаметр частиц муки в основном определяется генами мягкозерности, тогда как стекловидность – сложно контролируемый признак, в значительной мере подверженный влиянию внешней среды. Молекулярное картирование локуса (QTL) для твердозерности (описываемой диаметром частиц муки при размоле), как правило, выявляет главный локус (QTL) в хромосоме 5D в районе гена *Ha* (McIntosh et al., 2013). Хотя стекловидность в значительной степени коррелирует с твердозерностью, и QTL, контролирующие этот признак, картированы в сходном положении, для этого признака выявлены и другие главные локусы на других хромосомах пшеницы (Pshenichnikova et al., 2008).

Полученная ранее супермягкозерная линия SSL имела специфические физические свойства теста,

а именно низкую силу муки и упругость, которые делают ее пригодной для целенаправленного использования в кондитерских целях (Реѝа, 2002). Поэтому мы изучили эти свойства у всех упомянутых выше образцов. На рисунке 3 и в таблице 2 представлены средние значения физических свойств теста у линий с разным сочетанием генов мягкозерности эндосперма *Ha* и *Ha-Sp*, а также яровых родительских форм. Линия F₈ (Голубка × 84/98^w) показала сходную с линией SSL низкую силу муки, которая, в частности, требуется для кондитерских изделий (Реѝа, 2002). При этом эта линия имела более низкую упругость, но более высокую растяжимость. Это, вероятно, связано с тем, что реологические свойства определяются не только структурой эндосперма, но и аллельным составом запасных белков клейковины.

Наибольшее разнообразие по физическим свойствам муки и теста было обнаружено у гибридов третьего поколения Лютеценс 62 × 84/98^w (см. рис. 3). Семья 3 имела самые высокие показатели силы муки и упругости, 188,4 е.а. и 124,6 мм, соответственно. Это позволяет отнести линию к хлебопекарным пшеницам-филлерам (Fedin, 1988) и свидетельствует в пользу того, что линия утратила оба гена мягкозерности. Две другие семьи значительно отличались от нее по этим признакам. Все три линии имели довольно низкую растяжимость теста и сильно различались по сбалансированности теста. Скорее всего, они будут различаться и по смешительным характеристикам.

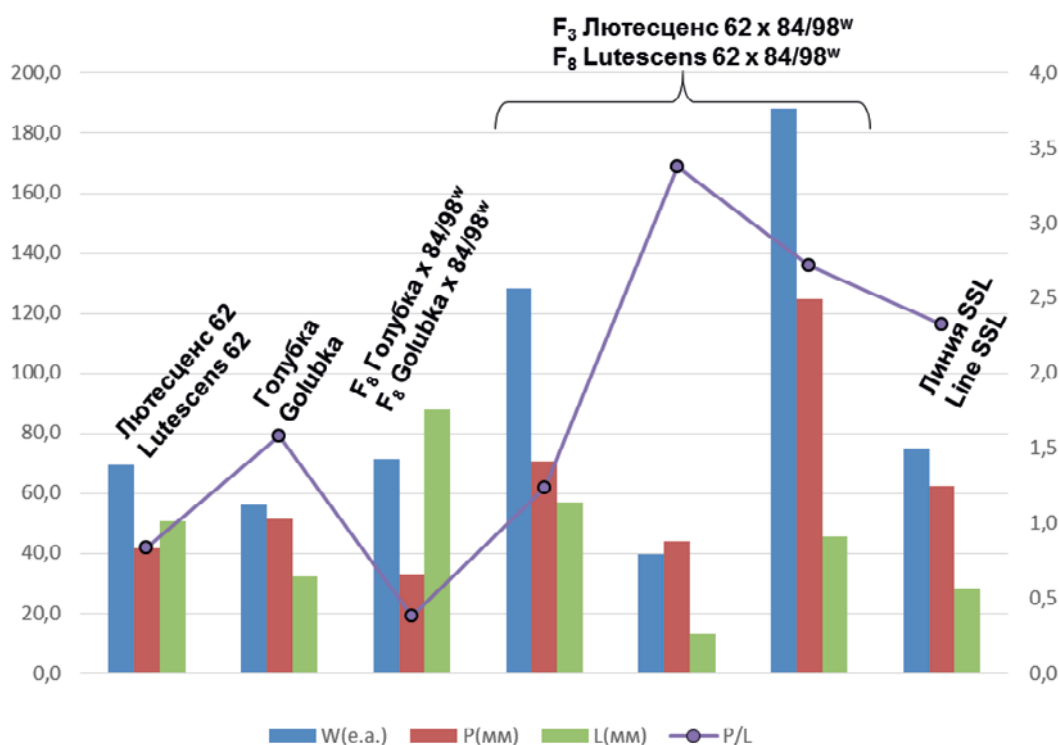


Рис. 3. Физические свойства муки и теста по альвеографу у генотипов с различным сочетанием генов мягкозерности эндосперма *Ha* и *Ha-Sp*.

W – сила муки в единицах альвеографа (е.а.); P – упругость и L – растяжимость теста в миллиметрах; P/L – сбалансированность теста

Fig. 3. Physical properties of flour and dough (alveographic test) in genotypes with different combinations of genes for endosperm soft grain *Ha* and *Ha-Sp*.

W – flour strength in units of alveograph (e.a.); P – dough elasticity; L – dough extensibility in millimeters; P/L – dough balance

Заключение

В результате нашей работы впервые получен набор супермягкозерных линий со специальными свойствами зерна и муки. Они могут быть востребованы для широкого спектра производственного назначения как в пищевых, так и в технических целях. Полученные линии нуждаются во всесторонней оценке специалистов-технологов пищевого производства. В настоящее время в России существенно расширился спектр изделий из муки в различных национальных кухнях. Для них часто требуется мука с особыми характеристиками, отличными от тех, которые предъявляются к хлебопекарной муке. Вариативность по структуре эндосперма в комплексе с разнообразием по содержанию белка и клейковины и ее качеству у сортов пшеницы позволяет удовлетворять различные потребности производителей. Для производства различных кондитерских изделий и видов пиццы (Peña, 2002; Tehseen et al., 2014; Sharma et al., 2020; SuperFlour..., 2017) можно использовать непосредственно муку таких супермягкозерных линий или адаптировать для этого муку хлебопекарного назначения. Это позволит избежать внесения различных химических добавок, в частности, химических разрыхлителей и крахмала, в производственном процессе. В некоторых странах, например в Канаде, зерно с такими показателями представляет отдельный товарный класс (Canadian Grain..., 2015). В настоящее время известны нуклеотидные последовательности генов мягкозерности, к ним подобраны эффективные праймеры (Sharma et al., 2020). Это позволяет проводить целенаправленный отбор сортов с определенной структурой эндосперма и технологическим назначением зерна с помощью маркер-ориентированной селекции.

Исследование было поддержано бюджетным проектом № 0324-2019-0040-С-01. Полевой материал для анализа был получен при содействии ЦКП ИЦиГ СО РАН «Селекционно-генетическая лаборатория».

Авторы выражают искреннюю благодарность Н. М. Ковалёвой и А. К. Чистяковой за выполнение технологических анализов.

The study was supported by Budget Project No. 0324-2019-0040-С-01. Cultivation in the field was carried out courtesy of the Center for Collective Use "Breeding and Genetic Laboratory", IC&G SB RAS.

The authors express their sincere gratitude to N. M. Kovaleva and A. K. Chistyakova for performing technological analyses.

References / Литература

- Canadian Grain Commission. Official Grain Grading Guide. Wheat. 2015. Available from: <http://www.grainscanada.gc.ca/index-eng.htm> [accessed Nov. 10, 2020].
- Giroux M.J., Morris C.F. Wheat grain hardness results from highly conserved mutations in the friabilin components puroindoline a and b. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1998;95(11):6262-6266. DOI: 10.1073/pnas.95.11.6262
- Fedin M.A. (ed.). Methodology for state crop variety trials: technological assessment of cereal, groat and pulse crops (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur: tekhnologicheskaya otsenka zernovykh, krupyanykh i zernobobovykh kultur). Moscow: State Commission for Crop Variety Trials; 1988. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур: технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур / под ред. М.А. Фебина. Москва: Госкомиссия по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур; 1988).
- GOST 10987-76. Inter-state standard. Grain. Methods for determination of vitreousness. In: *Grain. Methods of analysis: Collection of State Standards (Zerno. Metody analiza: Sbornik GOSTov)*. Moscow; 2001. [in Russian] (ГОСТ 10987-76. Зерно. Межгосударственный стандарт. Методы определения стекловидности. В кн.: *Сборник ГОСТов Зерно. Методы анализа: Сборник ГОСТов*. Москва; 2001). URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-10987-76> [дата обращения: 10.09.2020].
- GOST P 54478-2011. National Standard of the Russian Federation. Grain. Methods for determination of quantity and quality of gluten in wheat. Moscow: Standartinform; 2012. [in Russian] (ГОСТ P 54478-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. Москва: Стандартинформ; 2012). URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-54478-2011> [дата обращения: 10.09.2020].
- Kozmina N.P. Grain science (Zernovedeniye.) Moscow: Zagotizdat; 1955. [in Russian] (Козьмина Н.П. Зерноведение. Москва: Заготиздат; 1955).
- Lapochkina I.F., Yatchevskaya G.L. Pollen irradiation method in a distant wheat hybridization. *Annual Wheat Newsletter*. 1997;43:193-195.
- McIntosh R.A., Yamazaki Y., Dubcovsky J., Rogers W.J., Morris C., Appels R., Xia X.S. Catalogue of gene symbols for wheat. 2013. Available from: <http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/symbolClassList.jsp> [accessed Sept. 10, 2020].
- Morris C.F. Puroindolines: the molecular genetic basis of wheat grain hardness. *Plant Molecular Biology*. 2002;48(5-6):633-647. DOI: 10.1023/A:1014837431178
- Peña R.J. Wheat for bread and other foods. In: B.C Curtis, S. Rajaram, H.G. Macpherson (eds). *Bread Wheat – Improvement and Production. FAO Plant Production and Protection Series*. Rome; 2002. Available from: <http://www.fao.org/3/y4011e0w.htm#bm32> [accessed Sept. 17, 2020].
- Pshenichnikova T.A., Ermakova M.F., Chistiakova A.K., Shchukina L.V., Berezovskaia E.V., Lochwasser U., Röder M., Börner A. Mapping of the quantitative trait loci (QTL) associated with grain quality characteristics of the bread wheat grown under different environmental conditions. *Russian Journal of Genetics*. 2008;44(1):74-84. DOI: 10.1134/S1022795408010109
- Pshenichnikova T.A., Simonov A.V., Ermakova M.F., Chistyakova A.K., Shchukina L.V., Morozova E.V. The effects on grain endosperm structure of an introgression from *Aegilops speltoides* Tausch into chromosome 5A of bread wheat. *Euphytica*. 2010;175(3):315-322. DOI: 10.1007/s10681-010-0168-1
- Simonov A.V., Chistyakova A.K., Morozova E.V., Shchukina L.V., Börner A., Pshenichnikova T.A. The development of a new bread wheat genotype carrying two loci for endosperm softness *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(3):341-346. [in Russian] (Симонов А.В., Чистякова А.К., Морозова Е.В., Щукина Л.В., Бёрнер А., Пшеничникова Т.А. Создание нового для мягкой пшеницы генотипа – носителя двух локу-

сов мягкозерности эндосперма. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(3):341-346. DOI: 10.18699/VJ17.251

Sharma Y., Sheikh I., Sharma A., Yadav A.N., Kumar K., Chhuneja P. et al. Transfer of grain softness from 5U-5A wheat-*Aegilops triuncialis* substitution line to bread wheat through induced homeologous pairing. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 2020;29(3):407-417. DOI: 10.1007/s13562-020-00554-z

Shibaev P.N., Gusev I.S., Samsonov M.M. Vitreousness and structural-mechanical properties of wheat grain (Steklovidnost i strukturno-mekhanicheskiye svoystva zerna

pshenitsy). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1974;3:22-26. [in Russian] (Шибаев П.Н., Гусев И.С., Самсонов М.М. Стекловидность и структурно-механические свойства зерна пшеницы. *Селекция и семеноводство*. 1974;3:22-26).

SuperFlour (SuperMuka). 2017. [in Russian] (СуперМука. 2017). URL: <http://super-muka.ru/> [accessed Nov. 17, 2020].

Tehseen S., Anjum F.M., Pasha I., Khan M.I., Saeed F. Suitability of spring wheat varieties for the production of best quality pizza. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(8):1517-1524. DOI: 10.1007/s13197-012-0666-3

Прозрачность финансовой деятельности / The transparency of financial activities

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

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

Для цитирования / How to cite this article

Симонов А.В., Пшеничникова Т.А. Технологические свойства зерна и муки у линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) – носителей локусов *Ha* и *Ha-Sp*, определяющих структуру эндосперма. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021;182(1):91-98. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-91-98

Simonov A.V., Pshenichnikova T.A. Technological properties of grain and flour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes carrying two loci that determine the endosperm structure. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):91-98. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-91-98

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

Дополнительная информация / Additional information

Полные данные этой статьи доступны / Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-1-91-98>

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

Авторы одобрили рукопись / The authors approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует / No conflict of interest

ORCID

Simonov A.V. <https://orcid.org/0000-0001-6708-3822>

Pshenichnikova T.A. <https://orcid.org/0000-0001-5639-916X>