



Биохимический состав и технологическая оценка зерна интрогрессивных форм озимой мягкой пшеницы с участием различных видов *Triticum* и *Aegilops*

А.И. Аbugалиева✉, Т.В. Савин

Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства, Алматы, Казахстан

Для создания стрессоустойчивых, продуктивных и качественных сортов пшеницы нередко используется генетическое разнообразие диких и культурных сородичей – различных видов, относящихся к родам *Triticum* и *Aegilops*. Ранее с участием образцов *Triticum militinae*, *T. timopheevii*, *T. kiharae*, *Aegilops cylindrical* и *Ae. triaristata* были созданы и отобраны по устойчивости и урожайности интрогрессивные формы озимой мягкой пшеницы. Целью настоящей работы стала оценка биохимического состава и технологических свойств зерна данных форм. Анализ муки по содержанию клейковины методом ИСО выявил уровень изменчивости от 28.5 % для формы Эритроспермум 350 × *T. militinae* до 39.6 % для генотипа Жетысу × *T. militinae*. При этом качество клейковины первой группы (класс «сильная») выявлено только для генотипов Эритроспермум 350 × *T. militinae* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*. По физическим свойствам муки и теста интрогрессивные формы варьируют по разжижению теста от 80 до 170 е. ф., т. е. на уровне «филлера» и «слабой» пшеницы, с лучшим значением как по разжижению, так и по валориметрической оценке для генотипов Безостая 1 × *Ae. triaristata* и Эритроспермум 350 × *T. militinae* (80 ед. разжижения, 49 ед. фаринографа и 80–45 е. ф. соответственно). Хлебопекарная оценка показывает, что из муки зерна интрогрессивных форм выпекается хлеб объемом, сопоставимым с сортами, в том числе выше сортов-стандартов Алматы (720–760 мл) и Карахан (800 мл) по внешнему виду, пористости хлеба и общей хлебопекарной оценке. По твердозерности дикие сородичи и интрогрессивные формы характеризовались в основном как средние и твердозерные (52–93 ед. SKCS). Таким образом, по технологической оценке хлебопекарного типа изученные интрогрессивные формы относятся в основном к классам «ценная» и «филлер», по силе муки и объему хлеба – к классу «слабая», при прогнозе по составу ВМС глютеина и наличию транслокации 1B/1R – к классу «сильная».

Ключевые слова: *Triticum militinae*; *Triticum timopheevii*; *Triticum kiharae*; *Aegilops cylindrical*; *Aegilops triaristata*; дикие сородичи; интрогрессивные формы; качество зерна; качество муки; качество хлеба; озимая мягкая пшеница; содержание белка; содержание клейковины; субъединицы глютеина.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

Аbugалиева А.И., Савин Т.В. Биохимический состав и технологическая оценка зерна интрогрессивных форм озимой мягкой пшеницы с участием различных видов *Triticum* и *Aegilops*. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018;22(3):353-362. DOI 10.18699/VJ18.371

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Abugaliyeva A.I., Savin T.V. The wheat introgressive form evaluation by grain biochemical and technological properties. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(3):353-362. DOI 10.18699/VJ18.371 (in Russian)

The wheat introgressive form evaluation by grain biochemical and technological properties

A.I. Abugaliyeva✉, T.V. Savin

Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing, Almaty, Kazakhstan

To create stress-resistant, productive and quality wheat varieties, the genetic diversity of wild and cultured relatives is often used – various species belonging to the genera *Triticum* and *Aegilops*. Previously, with *Triticum militinae*, *T. timopheevii*, *T. kiharae*, *Aegilops cylindrical* and *Ae. triaristata* samples participation, introgressive winter common wheat forms were created and selected for stability and yield. The purpose of this work was to evaluate the biochemical composition and technological grains properties of these forms. Analysis of gluten content in flour by the ISO method revealed a variability level from 28.5 % for the form Erythrosperrum 350 × *T. militinae* to up to 39.6 % for the Zhetysu × *T. militinae* genotype. In this case, the 1st groups gluten quality (class “strong”) was found only for the genotypes Erythrosperrum 350 × *T. militinae* (Bezostaya 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*. According to the physical properties of flour and dough, the introgressive forms vary in the test dilution from 80 to 170 FU at the level of “filler” and “weak” bread wheat with the best value for both liquefaction and valormetric evaluation for the genotypes Bezostaya 1 × *Ae. triaristata* and Erythrosperrum 350 × *T. militinae* (80 liquefaction units 49 FU and 80–45 FU, respectively). Bread making evaluation for the introgressive forms was comparable with winter wheat varieties including the Almaty standards (720–760 ml) and Karakhan (800 ml), at the bread quality and the baking evaluation. As for hardness, wild relatives and introgressive forms were characterized mainly as medium and hard (52–93 SKCS units). Thus, the introgressive forms studied were mainly related to the “valuable” and “filler” classes according to the technological bakery type evaluation, to the “weak” class according to the flour strength and bread volume, and to the “strong” class at the glutenin HMW composition forecast and the translocation of 1B/1R.

Key words: *Triticum militinae*; *Triticum timopheevii*; *Triticum kiharae*; *Aegilops cylindrical*; *Aegilops triaristata*; wild relatives; introgressive forms; grain quality; flour quality; quality of bread; winter common wheat; protein content; gluten content; glutenin subunits.

Для расширения возможностей селекции и создания стрессоустойчивых, продуктивных и качественных сортов важное значение имеет использование генофонда диких сородичей. Известно, что геном D положительно влияет на характеристики, связанные с продуктивностью и качеством зерна хлебопекарного типа. Улучшение D-генома пшеницы путем получения синтетических гексаплоидов и прямой гибридизации с донором D-генома (*Aegilops tauschii*) с оценкой преимуществ и недостатков использования каждого метода рассмотрено в работе (Cox et al., 2017). Создание синтетических гексаплоидов позволило достигнуть улучшения по таким показателям качества, как прорастание на корню (Lan, Yen, 1992; Imtiaz et al., 2008), наличие новых высокомолекулярных субъединиц (ВМС) глютеина (Lagudah et al., 1987; Mackie et al., 1996; Hsam et al., 2001; Tang et al., 2008), качество помола и хлебопекарное качество (Kunert et al., 2007; Tang et al., 2008). Результаты прямой гибридизации дали положительный эффект по смеси ценности (Cox et al., 1995a, b; 1997), наличию новых компонентов глиаина и ВМС глютеина и объему хлеба (Brown-Guedira et al., 2005).

Оба подхода оказали значительное влияние на улучшение генофонда пшеницы. Синтетические гексаплоиды используются как ценные генетические ресурсы в селекционных программах международных центров CIMMYT, ИКАРДА и национальных программах в Австралии, Франции, Японии, Мексике, Нидерландах, Великобритании, США, а также в Китае (Li et al., 2014; Cox et al., 2017), где получен ряд высокоурожайных сортов из синтетических линий, начиная с весьма успешного сорта Chuanmai 42.

Известно, что интрогрессивные линии пшеницы, полученные от прямого скрещивания *Triticum aestivum* с *Aegilops tauschii*, широко применялись в качестве родительских форм селекционерами озимой пшеницы в США и в других странах. Девятнадцать сортов селекции США, созданные с 1999 по 2011 г. для возделывания в южном регионе страны, характеризовались наличием *Ae. tauschii* в их родословных (Gill et al., 2006).

К главному преимуществу метода прямой гибридизации можно отнести быстрое введение генетического материала *Ae. tauschii* в геном D, сопровождающееся полным сохранением аллельного состава локусов в А- и В-геномах используемого в скрещиваниях сорта *T. aestivum*. У полученных интрогрессивных форм локусы в геномах А и В, определяющие важные характеристики, такие как яровизация и реакция фотопериода, способность к прорастанию, а также количественные признаки, связанные с продуктивностью, толерантностью и качеством зерна, остаются такими же, как у родительского сорта, в то время как в геном D привносятся новые полезные аллели. Тем не менее ряд авторов утверждают, что прямая гибридизация для улучшения пшеницы не получила должного внимания (Ogbonna et al., 2013).

В настоящее время, с внедрением новых технологий актуальными становятся целенаправленный поиск и перенос конкретных генов. При удачном решении проблем продуктивности и устойчивости определяющим для использования зерна является вопрос его качества. Сведения по генетике признаков качества зерна представлены в обзорах

(Хлесткина и др., 2016; Alvarez, Guzman, 2018), где справедливо отмечено, что путем маркер-контролируемого введения полезных генов от диких видов в культурные формы растений можно эффективно создавать исходный материал для селекции по качеству зерна.

Наиболее развиты работы интрогрессивной селекции по получению и характеристике технологических свойств пшенично-эгилопсных форм (Щукина и др., 2012) на основе анализа содержания белка и качества зерна. В качестве донора гена *Gpc-B1*, влияющего на накопление белка, цинка и железа в зерне (локализованного в хромосоме 6BS, клонированного и детально изученного), используется также вид *T. dicoccoides* (Uauy et al., 2006), у которого впервые был идентифицирован функциональный вариант гена. С помощью молекулярных маркеров функциональный аллель этого гена был затем обнаружен и у некоторых местных и старых селекционных сортов: *T. dicoccum*, *T. durum*, *T. spelta* и *T. aestivum*. Гены, родственные *Gpc-B1 T. dicoccoides*, найдены в G-геноме *T. timopheevii* и В(=S)-геноме различных видов *Aegilops* секции *Sitopsis*. Благодаря разработке молекулярных маркеров, выявляющих функционально активные и/или неактивные аллели *Gpc-B1*, стал возможен генетический скрининг образцов коллекций и ускоренный отбор из гибридных популяций генотипов с определенным составом аллелей (Vishwakarma et al., 2014; Mishra et al., 2015). О возможности передачи генов высокого содержания белка не только от *T. dicoccum*, но и от других образцов дикой двузернянки сообщалось в работах (Klindworth et al., 2009; Aukut Tonk et al., 2010; Hussein et al., 2014). Интрогрессия функциональных аллелей *Gpc-B1* – ценный ресурс для улучшения содержания белка в зерне (Tabbata et al., 2013). По мнению Н.А. Eagles с коллегами (2014), введение функциональных аллелей *Gpc-B1* в новые сорта может служить механизмом для частичного ослабления существующей отрицательной корреляции между урожайностью и содержанием белка.

С этой точки зрения представляют ценность интрогрессивные формы из межвидовых и межродовых гибридов с планомерным отбором пшеничного типа до F₆–F₈ поколения, постоянным цитологическим контролем в ранних поколениях 42-хромосомных форм (Кожухметов, Абуғалиева, 2017; Кожухметов и др., 2017а, б), отличающиеся устойчивостью к болезням (Абуғалиева et al., 2017) и продуктивностью на уровне 8–9 т/га.

Для использования этого материала в практических целях необходима характеристика биохимического состава зерна на фоне продуктивности. Детальное фенотипирование материала по качеству зерна перспективно для дальнейшего генетического анализа интрогрессивных форм с участием различных видов. К тому же переходные формы служат наиболее оптимальным материалом для оценки и последующего переноса уникальных для пшеницы генов аллелей от ее дикорастущих сородичей. Поддерживать и сохранять в норме выявленный ген (аллель) пшенично-чужеродных гибридов (ПЧГ) намного проще, чем отслеживать его в популяциях диких сородичей.

Целью настоящей работы было изучить биохимический состав и дать технологическую оценку зерна интрогрессивных форм пшеницы относительно диких сородичей и

коммерческих сортов с выделением источников и перспективных генотипов для использования в селекции.

Материалы и методы

В работе использовался следующий растительный материал: генофонд тетраплоидных (*T. dicoccum*, *T. militinae*, *T. timopheevii*, *T. dicoccoides*) и гексаплоидных (*T. kiharae*, *T. aestivum*) видов пшениц и эгилопсов (*Ae. triuncialis*, *Ae. triaristata*), а также константные переходные формы из межродовых и межвидовых скрещиваний (интрогрессивные) F₆–F₈ (Kozhakhmetov, Abugaliev, 2014). Материал выращен в 2006–2009 и 2014–2016 гг. в условиях стационара зернофуражных культур КазНИИ земледелия и растениеводства (КИЗ), 42° с.ш., 77° в.д., 740 м над ур. моря. Образцы посеяны на делянках площадью 5 м² в двух полевых повторениях в соответствии с принятой агротехникой для озимой пшеницы, согласно общей схеме эксперимента (Савин и др., 2018).

Содержание белка в зерне и его фракций определяли методом Кьельдаля (ГОСТ 10846-91) и БИК-спектроскопией по разработанным калибровочным уравнениям (Перуанский и др., 1996). Содержание крахмала устанавливали поляриметрическим методом, амилозы – йодометрическим титрованием по Juliano с модификациями (Перуанский и др., 1996). Показатель седиментации муки находили методом Зелени (в молочной кислоте) и в 2%-й уксусной кислоте (Синицын, Зелова, 1978), физико-химические и реологические свойства муки и теста – на приборах альвеограф и фаринограф. Общую хлебопекарную оценку, анализ содержания и качества клейковины проводили методами соответствующих ГОСТ и ИСО (Приложение 1)¹. Экстракцию и электрофорез глютеина осуществляли, как описано ранее (Abugaliev, Peña-Bautista, 2010).

Кластерный анализ проведен по алгоритму С.П. Мартынова с использованием минимума произведения между евклидовыми расстояниями и коэффициентом корреляции $D(1-R)^2$, описанному ранее (Савин и др., 1998).

Результаты и обсуждение

Биохимический состав

Интрогрессивные формы озимой пшеницы проанализированы по содержанию белка (N×5.7). Максимальное содержание протеина отмечено для форм с участием *Ae. cylindrica*, *T. kiharae*, *T. militinae* и *T. timopheevii* при общем повышенном фоне для интрогрессивных форм по средним значениям (15.4–17.3 %) относительно современных коммерческих сортов (14.0–16.4 %). Содержание белка (N×5.7) в зерне переходных озимых форм варьировало в условиях КИЗ от 13.9 % (Безостая 1×*T. militinae*)×*T. militinae* до 21.4 % для формы Безостая 1×*Ae. cylindrica*, т.е. было на уровне класса хороших (>14 %) и отличных (>16 %) улучшителей на фоне урожайности от 9.6 до 28.8 ц/га. Содержание белка на уровне класса отличных улучшителей (>16 %) характерно для большинства (70–100 % от всех исследованных) интрогрессивных форм от скрещиваний: Жетысу×*T. kiharae* (100 %); Жетысу×*T. militinae* (92 %); Жетысу×

T. timopheevii (83 %); Стекловидная 24×*T. timopheevii* (75 %); Эритроспермум 350×*T. kiharae*, Стекловидная 24×*Ae. cylindrica*, Безостая 1×*Ae. cylindrica*, (Безостая 1×*Ae. triaristata*)×Карлыгаш (90 %). Только три формы (Безостая 1×*T. militinae*)×*T. militinae*-6, (Безостая 1×*T. militinae*)×*T. militinae*-4 и (Безостая 1×*Ae. cylindrica*)×*T. kiharae* формировали в 10 % случаев содержание протеина ниже класса «ценная», а для современных сортов – в более чем 50 % образцов (Жетысу, Стекловидная 24 и Алмалы).

Анализ фракционного состава белка проведен по классическим осбонровским фракциям: глобулин (солеорастворимая), глиадин (спирторастворимая), глютеин (щелочерастворимая) и нерастворимый остаток относительно сорта-стандарта Алмалы и диких сородичей (Приложение 2). Содержание глютеина относительно суммарного белка у интрогрессивных форм варьировало от 26.3 % для генотипа Стекловидная 24×*Ae. cylindrica* до 34.4–32.9 % для генотипов Эритроспермум×*T. kiharae* и Жетысу×*T. militinae*, тогда как у диких сородичей этот показатель менялся от 14.3 % для *T. kiharae* до 20.1 % для *T. timopheevii* и 35.7 % для сорта-стандарта Алмалы. Два генотипа характеризовались равным содержанием глютеина и глобулина или преобладанием глобулиновой фракции: Эритроспермум 350×*T. militinae*-1 (29 и 28 %) и Стекловидная 24×*Ae. cylindrica* (28 и 26 %). Максимальное содержание глобулина отмечено у трех генотипов: Эритроспермум 350×*T. militinae*, (Безостая 1×*T. militinae*)×*T. militinae*-6, Стекловидная 24×*Ae. cylindrica*, что объясняется участием в их происхождении гермоплазмы *T. militinae* с содержанием глобулина в этой же репродукции до 35.7 %.

По интрогрессивным формам в урожае 2014 г. содержание глиадина по отношению к суммарному белку варьировало от 22.8–23.1 % для генотипов Эритроспермум 350×*T. militinae*, (Безостая 1×*T. militinae*)×*T. militinae*-9, Эритроспермум 350×*T. kiharae* до 28.3 % для генотипа Жетысу×*T. timopheevii*. При этом диапазон изменчивости для современных сортов (родительских форм) составлял от 29.9 % (Стекловидная 24) до 34.3 % (Безостая 1), а для диких сородичей – от 15.2 % (*T. kiharae*) до 33.7 % (*T. timopheevii*). Содержание глиадина в зависимости от генотипа варьировало в значительных пределах. Максимальные значения (в двух репродукциях) характерны для генотипов (Безостая 1×*Ae. cylindrica*)×*T. kiharae*, Жетысу×*T. kiharae*, Жетысу×*T. militinae*, Безостая 1×*Ae. cylindrica* и Жетысу×*T. timopheevii*. Соотношение глиадин/глютеин для интрогрессивных форм равнялось 0.7–1.0, как для пшеничного типа; для видов сородичей, напротив, отмечено преобладание глиадина (1.1–1.7).

Изменчивость содержания белка и белковых фракций – альбуминов + глобулинов, глиадинов и глютеинов – оценивалась по влиянию двух разных мест выращивания на количественный состав белка для *T. emmer* и *T. aestivum*. Результаты исследований (Eggert et al., 2010) показали, что инфекция *Fusarium* изменила содержание глиадинов и глютеинов в зерне эммера и пшеницы. Обнаружено, что фракции и типы пшеничных глютеинов сильнее подвержены влиянию *Fusarium* spp., чем фракции глю-

¹ Приложения 1–6 см. по адресу:
<http://www.bionet.nsc.ru/vogis/download/pict-2018-22/appx6.pdf>

тенина. Внесение азота в двух регионах было связано с увеличением содержания гиадина в *T. emmer* и увеличением содержания глютеина в *T. emmer* и пшенице. Доступность азота (фактор, способствующий экспрессии генов) привела здесь к видоспецифическому влиянию на соотношение гиадин/глютеин (Eggert et al., 2010).

Таким образом, содержание гиадина и глютеина и их соотношение информативны для прогноза качества, а степень изменчивости их количества и компонентов может быть эффективна в оценке стрессоустойчивости и видоспецифичности (Перуанский и др., 1999; Eggert et al., 2010).

Для технологических целей важна сумма гиадина и глютеина – основных белков клейковинного комплекса. Сумма клейковинных белков в зерне интрогрессивных форм озимой пшеницы составляет ряд от 52.1–52.9 % для генотипов Эритроспермум 350 × *T. militinae* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 до 59.2–59.4 % для генотипов Жетысу × *T. timopheevii* и Жетысу × *T. militinae* на фоне 60.9 % для сорта-стандарта Алмалы. Такого количества белков достаточно для формирования клейковины. Соотношение гиадин/глютеин меняется от 0.7 до 1.0, что позволяет прогнозировать хорошее качество клейковины, в сравнении с дикими формами, у которых преобладает гиадин.

Содержание крахмала в зерне интрогрессивных форм варьировало от 52.9 % для Жетысу × *T. militinae* до 61.3 % для (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6, т.е. было на уровне сортов, но выше, чем в зерне диких сородичей (*T. kiharae* – 50.6–53.3 %; *T. militinae* – 50.0–50.2 %; *Ae. triaristata* – 52.2 %).

Содержание амилозы в зерне варьировало от 17.3 % для генотипа (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш до 38.0 % для генотипов Эритроспермум 350 × *T. kiharae* и Жетысу × *T. militinae*, что превышало этот показатель для диких сородичей (*Ae. triaristata* – 9.6 %; *T. kiharae* и *T. timopheevii* – 18.0–21.8 %).

Анализ диких, культурных и интрогрессивных форм озимой пшеницы по биохимическому составу зерна методом многомерного статистического анализа позволил сгруппировать генотипы в три кластера: 1) интрогрессивные формы и сорт Комсомольская 1; 2) дикие виды; 3) преимущественно сорта и две интрогрессивные формы (рис. 1).

Интрогрессивные формы объединены в один кластер, что свидетельствует о сходстве их по биохимическому составу между собой и с видами *T. timopheevii* и *T. militinae*. Отдельный кластер образуют коммерческие сорта вместе с двумя интрогрессивными формами; они имеют схожее содержание протеина, его фракций, а также крахмала и амилозы.

Таким образом, по содержанию протеина для хлебопечкарного типа наиболее перспективны формы Эритроспермум 350 × *T. militinae*, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 и Безостая 1 × *Ae. cylindrica*, которые формируют зерно класса «сильная» (14–16 % и выше), и генотип (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4 – класс «ценная». Сумма гиадиновых и глютеиновых фракций вполне достаточна для формирования клейковины от 52.1 до 59.2 % относительно сорта-стандарта Алмалы.

Технологическая характеристика интрогрессивных форм озимой пшеницы

По среднепогодным данным (семь репродукций), натурная масса зерна синтетических форм озимой пшеницы варьирует от 703 до 819 г/л: 744 г/л для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и 770–776 г/л для генотипов Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica*, Стекловидная 24 × *T. militinae*, Стекловидная 24 × *T. timopheevii*. У сорта-стандарта Алмалы этот показатель равен 767–816 г/л. Стабильно низкой натурой зерна отличались генотипы Эритроспермум 350 × *T. kiharae* и Безостая 1 × *Ae. cylindrica*. В отдельных репродукциях отмечен как низконатурный генотип (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae*.

В целом интрогрессивные формы формировали зерно класса «ценная» (50–100 % для разных интрогрессивных форм) и класса «филлер» (20–40 %). Зерно, отвечающее классу «сильная» (более 800 г/л), формировалось в 16 % всех исследованных случаев для генотипов Стекловидная 24 × *T. timopheevii* и Стекловидная 24 × *T. militinae* и в 10–12 % случаев – для генотипов Эритроспермум 350 × *T. militinae*, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*, Эритроспермум 350 × *T. kiharae*, Жетысу × *T. timopheevii*, Безостая 1 × *Ae. cylindrica*.

Интрогрессивные формы характеризовались высоконатурным зерном относительно диких сородичей для *T. timopheevii* (677–749 г/л), *T. militinae* (640–708 г/л), *Ae. cylindrica* (357–403 г/л), *Ae. triaristata* (689–713 г/л) и находились на уровне коммерческих сортов Жетысу (723–775 г/л), Стекловидная 24 (729–769 г/л), Эритроспермум 350 (696–739 г/л), Безостая 1 (725–774 г/л), Алмалы (749–816 г/л), Сапалы (790–798 г/л).

Данные по натурной массе коррелируют с крупностью и выравниваемостью в исходных популяциях (F_5 – F_8). Зерно интрогрессивных форм озимой пшеницы характеризуется как крупное, с суммой прохода через сита 2.8 и 2.5 мм более 80 % и преобладанием фракции 2.8 мм (от 42 до 64 %). Генотипам Эритроспермум 350 × *T. militinae* и Эритроспермум 350 × *T. kiharae* свойствен баланс фракций 2.8 и 2.5 мм (36–42 и 44–41 % соответственно).

По стекловидности зерна интрогрессивные формы пшеницы, как и дикие сородичи, относятся в основном к классу «сильная». В условиях полива у отдельных генотипов уровень стекловидности снижается до класса «ценная» – генотип (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae* и класса «филлер» – (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4 и Стекловидная 24 × *T. timopheevii*.

Твердозерность и выход муки – показатели, определяющие технологический тип использования зерна. Твердозерность интрогрессивных форм изучена по семи репродукциям в Казахстане и двум репродукциям в Турции. По результатам исследований в шести из семи репродукций Казахстана все генотипы отнесены к классу «твердозерная + среднетвердозерная». В урожае 2016 г. (Турция) с сильным увлажнением в процессе вегетации сформировался провокационный фон для дифференциации генотипов по твердозерности и ее стабильности. Часть образцов стабильно отвечала требованиям класса «твердозерная + среднетвердозерная» по четырем генотипам: Эритроспермум 350 × *T. militinae*, (Безостая 1 ×

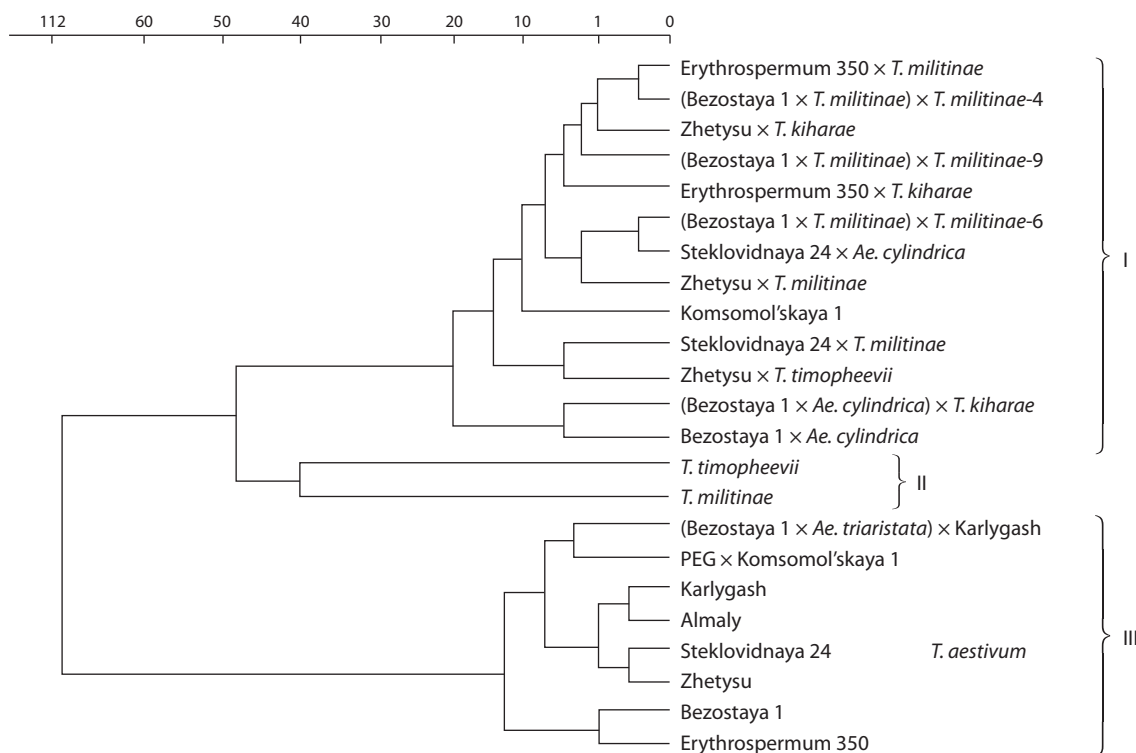


Fig. 1. Similarity and difference among wild, cultured, and introgression forms of winter wheat in grain biochemistry: contents of total protein, protein fractions, starch, and amylose.

T. militinae) × *T. militinae*-4, Жетысу × *T. timopheevii*, Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica*, (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, Эритропермум 350 × *T. kiharae*. Уровень класса «полумягкозерная» отмечен для отдельных образцов генотипов: (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6, Жетысу × *T. militinae*, Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и сортов Алмалы, Карахан. К классу «мягкозерная» в урожае 2016 г. в одной из полевых повторностей отнесены генотипы (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 и Стекловидная 24 × *T. timopheevii* с индексом твердозерности 28 ед. SKCS 4100.

Таким образом, в основном (восемь из девяти репродукций) интрогрессивные формы пшеницы относятся к классу «среднетвердозерная». В условиях увлажненного фона выделены генотипы классов «смесь», «полумягкозерная» и «мягкозерная». Неоднозначность твердозерности отдельных генотипов по полевым повторениям диктует необходимость изучения и интерпретации их как разных популяций для генотипов (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9; Жетысу × *T. militinae* и Стекловидная 24 × *T. timopheevii*. Установленный широкий спектр изменчивости твердозерности отдельных генотипов (от 28 до 69 ед. SKCS) на провокационном фоне позволяет констатировать высокий уровень генетического полиморфизма для отдельных популяций.

Судя по натурной массе и стекловидности, зерно интрогрессивных форм озимой мягкой пшеницы вполне пригодно для переработки в муку. Мука 70%-го выхода получена для всех образцов. Интрогрессивные формы характеризовались выходом муки от 63.7 % для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* до 75.0 % для Эритропер-

мум 350 × *T. militinae* (у сортов-стандартов Карахан и Алмалы – 64.8 и 77.3 % соответственно) за счет высокого содержания отрубей – 22.2 и 21.3 % для генотипов Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и Карахан; кормовой муки – до 8.8 и 9.9 % для генотипов Эритропермум 350 × *T. kiharae* и Эритропермум 350 × *T. militinae* соответственно. В условиях 2014 г. относительно низкий выход муки отмечен для генотипов Жетысу × *T. militinae*, Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9, что связано с условиями формирования зерна.

Мука, выработанная из зерна интрогрессивных форм пшеницы, по зольности относится к высшему сорту (0.47–0.55), за исключением муки из зерна генотипов: Эритропермум × *T. kiharae* – зольность 0.56–0.57 (1-й сорт), Эритропермум 350 × *T. militinae* – 0.57–0.61 (2-й сорт), а в урожае 2015 г. из зерна генотипов Жетысу × *T. timopheevii* – зольность 0.58–0.59 и Безостая 1 × *Ae. triaristata* – 0.57–0.58. По белизне муки наблюдалась аналогичная картина: мука отвечает требованиям высшего сорта, кроме муки из зерна генотипа Жетысу × *T. militinae* с белизной 50.3 ед., характерной для муки 1-го сорта. В то же время повышенная зольность муки и ее более темный цвет могут быть обусловлены более высоким содержанием микроэлементов, что в свою очередь связано с питательностью зерна. Интерес к этим формам возник в связи с биофортификацией пшеницы и повышенным содержанием в зерне Fe и Zn (Morgounov et al., 2007; Савин и др., 2009).

Седиментация муки (уксусная кислота, метод Зелени). Показатель седиментации муки в 2%-й уксусной кислоте (Синицин, Зелова, 1978) для интрогрессивных форм варьировал в значительных пределах в зависимо-

сти от генотипа: минимальные значения – от 24 мл для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* до 52 мл для (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae*; максимальные значения – от 56 мл для Безостая 1 × *Ae. cylindrica* до 90–92 мл для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, Стекловидная 24 × *T. timopheevii*; средние значения – от 36 мл для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* до 56–58 мл для генотипов Стекловидная 24 от *T. timopheevii* и (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae*. В целом исследованные генотипы озимой мягкой пшеницы представлены преимущественно (54 % всего блока) образцами класса «филлер»: от 30 % из всех исследованных (Жетысу × *T. timopheevii*) до 100 % (ПЭГ × Комсомольская 1, Стекловидная 24 × *T. militinae*). До 35 % всех образцов блока относятся к классу «ценная». Это генотипы (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae* (100 %), Стекловидная 24 × *T. timopheevii* (88 %), Эритроспермум 350 × *T. militinae*, Жетысу × *T. militinae* и Жетысу × *T. timopheevii* (70 %). Последний генотип выделяется также максимальным числом образцов класса «сильная» в урожае 2015–2016 гг. с уровнем седиментации 70–89 мл.

Наиболее высокий прогноз стабильного качества по седиментации в 2%-й уксусной кислоте отмечен для генотипов Стекловидная 24 × *T. timopheevii* (по сумме частоты встречаемости классов «сильная + ценная» – 12 + 88 % от всех изученных образцов); Жетысу × *T. timopheevii* (30 + 40 %); (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae* (0 + 100 %); (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш (20 + 30 %); Жетысу × *T. militinae* и Эритроспермум 350 × *T. militinae* (10 + 40 %) на фоне сорта-стандарта Алмалы (0 + 40 %). По норме реакции на условия года выращивания генотипы отличались от относительно стабильных: коэффициент изменчивости $k = 1.2$ для генотипов ПЭГ × Комсомольская 1, Стекловидная 24 × *T. militinae*, (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae*, Жетысу × *T. kiharae* по четырем вегетациям; $k = 1.9$ для генотипа Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* по семи репродукциям; $k = 2.7–3.6$ для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9*. Изменчивость седиментации по годам варьировала также от 1.5–1.8 раза в 2006 и 2014 гг. до 2.4–2.6 раза в 2007, 2008 и 2016 гг. в наиболее увлажненных и урожайных репродукциях.

По данным седиментации Зелени (осаждение муки в молочной кислоте), в репродукциях 2014–2016 гг. получена мука 1-го и 2-го класса качества, т. е. сильная и ценная: >70 мл и 69–50 мл с размахом изменчивости от 47 мл для генотипа (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9* до 82 мл для генотипов Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica*.

Использование более увлажненного и потенциально высокоурожайного фона позволило констатировать снижение качества муки, по данным седиментации Зелени, от 34–35 мл для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, Безостая 1 × *Ae. cylindrica* до 64–68 мл для генотипов Стекловидная 24 × *T. timopheevii*, Эритроспермум 350 × *T. militinae*, Жетысу × *T. militinae* и увеличение диапазона изменчивости ($k = 1.1–1.8$). К классу «сильная» относятся около трети всех исследованных образцов следующих генотипов: Безостая 1 × *Ae. cylindrica* (44 % класса «сильная»); Жетысу × *T. timopheevii* (40 %);

Стекловидная 24 × *T. timopheevii*, Жетысу × *T. militinae*, Эритроспермум 350 × *T. militinae* и (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш (30 %). К классу «ценная» относится около двух третей образцов для генотипов: Стекловидная 24 от *T. timopheevii* (70 % класса «ценная»); Эритроспермум 350 × *T. kiharae* (67 %); (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9* (60 %). Генотипы (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae* и Стекловидная 24 × *T. timopheevii* формируют во всех репродукциях ценное по качеству зерно (52–67 и 43–92 мл). Класс «ценная + слабая» характерен для зерна генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* в 45 % исследованных образцов (24–40 мл). Для генотипов (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-4* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9* преобладающее число образцов (58–70 %) представлено классом «слабая» с седиментацией 25–28 мл.

В сравнении с интрогрессивными формами дикие виды характеризуются более низким уровнем седиментации Зелени: 17–18 мл для *T. timopheevii*, *T. militinae* и 22–27 мл для эгилопсов, несмотря на высокое содержание протеина. Интрогрессивные формы вполне сопоставимы по уровню седиментации муки с сортами: Жетысу – 42–50 мл; Стекловидная 24 – 42–27 мл; Эритроспермум 350 – 42–60 мл; Безостая 1 – 45–54 мл; Карлыгаш – 46–47 мл.

В целом интрогрессивные формы относятся к классам «слабая» (30–100 % от исследованных образцов) и «ценная» (10–100 %); по данным седиментации в уксусной кислоте – к классам «сильная» (7–30 % образцов) и «слабая» (10–50 % образцов); по данным седиментации Зелени – к классам «ценная» (20–70 %) и «сильная» (17–44 %) в зависимости от генотипа, условий выращивания и их взаимодействий.

Содержание протеина в муке 70%-го выхода высшего сорта является показателем качества муки как продукта переработки зерна и варьирует в условиях КИЗ от 13.7 % для генотипа Эритроспермум 350 × *T. militinae* до 18.6 % для Безостая 1 × *Ae. cylindrica* в урожае 2014 г., от 13.4 % для генотипов Эритроспермум 350 × *T. kiharae* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9* до 17.5 % для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* в 2015 г. и от 12.2 % для генотипа (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9* до 16.3 % для генотипа Эритроспермум 350 × *T. militinae* в урожае 2016 г.

Высокому содержанию протеина как в зерне, так и в муке соответствует высокое содержание клейковины в муке – от минимального 27.2 % для генотипа Эритроспермум 350 × *T. militinae* и сорта-стандарта Алмалы до 46.0–48.0 % для генотипов Жетысу × *T. militinae*, Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae-9*. По количеству клейковины в муке практически все интрогрессивные формы относятся к классам «сильная» (78–100 %) и «ценная» (10–22 %) по сравнению с сортом-стандартом Алмалы (50 % «сильная» + 50 % «ценная»). Сравнение клейковины в зерне и в муке в различные годы позволило подтвердить высокое содержание клейковины, отвечающее требованиям класса «сильная» (50–100 % исследованных образцов) и «ценная» (20–50 %). Независимо от метода, объекта и репродукции, три генотипа характеризовались тенденцией снижения количества клейковины: Эритроспермум 350 × *T. militinae*.

нае (до 28.3 %), (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш (до 23.2 %) и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6 (23.0 %).

Для оценки качества клейковины пользовались принятым ранжированием (ед. ИДК): 45–75 – класс «сильная»; 40 и 85 – класс «ценная»; 35–20 и 90–100 – класс «филлер»; 105–120 – класс «слабая». Качество клейковины у интрогрессивных форм варьирует в значительных пределах: от 65 ед. ИДК для генотипа (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 до 115 ед. ИДК для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш и Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* и 110 ед. ИДК для генотипов Стекловидная 24 × *T. militinae*, Эритроспермум 350 × *T. kiharae* и Безостая 1 × *Ae. cylindrica*. По средним данным за семилетние испытания, качество клейковины варьирует от 86–91 ед. ИДК для (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9, Жетысу × *T. timopheevii*, (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae*, Жетысу × *T. militinae*, Стекловидная 24 × *T. timopheevii*, что соответствует второй группе качества (класс «хороший филлер»), до 98 ед. ИДК – класс «удовлетворительный филлер» (Приложение 3). Основная часть образцов (30–100 %) относится к классу «филлер». Уровнем класса «сильная» максимально характеризуются генотипы (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 (до 38 % от всех изученных образцов) и Эритроспермум 350 × *T. kiharae* (до 20 %). Уровень класса «ценная» максимально выявлен для генотипов (Безостая 1 × *Ae. cylindrica*) × *T. kiharae* и Жетысу × *T. timopheevii* – до 60 и 40 % соответственно. Класс «слабая» выявлен для генотипов Безостая 1 × *Ae. cylindrica* и Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* (до 40–45 %). Как наиболее качественные выделены генотипы (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 (75–90 ед. ИДК), а со слабой клейковиной – интрогрессивные формы с участием *Ae. cylindrica* (90–100 ед. ИДК).

Водопоглощательная способность муки для синтетических форм варьировала от 58.4 мл для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica*, сорта Карахан и 54.4 мл для генотипа Стекловидная 24 от *T. timopheevii* до 66.6 мл для генотипов Жетысу × *T. timopheevii* и Эритроспермум 350 × *T. militinae*. Стабильно максимальной степенью выраженности этого признака в трех репродукциях характеризовались формы Жетысу × *T. timopheevii*, Эритроспермум 350 × *T. militinae* и Жетысу × *T. militinae*.

По разжижению теста как отвечающие требованиям класса «сильная+ценная» выделяются генотипы Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* и Жетысу × *T. timopheevii* (до 60–66 % от всех изученных образцов) и половина всех образцов для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, Эритроспермум 350 × *T. militinae* и Стекловидная 24 × *T. timopheevii*. Основная часть исследованных образцов данного блока интрогрессивных форм относится к классу «филлер»: от 25 % для генотипа (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш и до 66 % для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* на фоне сортов-стандартов Алмалы (75 %) и Карахан (100 %).

Валориметрическая оценка изменяется в диапазоне от 21 е. ф. для генотипа (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4 до 56 и 62 е. ф. для генотипов Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* и (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш. Преобладающая часть образцов озимых интрогрессивных форм

относится к классу «филлер» по смесительной ценности (Приложение 4).

Таким образом, по физическим свойствам муки и теста синтетики варьируют по разжижению теста на уровне 80–170 е. ф., т. е. на уровне «филлера» и «слабой» пшеницы, с лучшим значением как по разжижению, так и по валориметрической оценке для генотипов (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш и Эритроспермум 350 × *T. militinae* – 80 ед. разжижения, 49 ед. фаринографа и 80–45 е. ф. соответственно в урожае 2014 г. Эти же генотипы стабильно выделялись и в последующем по валориметрической оценке: урожай 2015–2016 гг. – 62–57 и 50–55 е. ф. (класс «ценная», 67 и 50 % соответственно).

По данным альвеографирования, отношение P/L (упругость/растяжимость) характеризовало тесто из муки зерна интрогрессивных форм как растяжимое (менее 0.7). Лишь отдельные генотипы отвечали требованиям класса «сильная» (0.8–1.2) во второй полевой повторности: Эритроспермум 350 × *T. militinae* и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 и близкие к классу «ценная» генотипы Эритроспермум 350 × *T. kiharae* в урожае 2015 г. В целом по величине P/L большая часть образцов относится к классам «филлер» и «слабая».

По силе муки (W) стабильно повышенным значением (219–279 е. а.) выделяется генотип Жетысу × *T. timopheevii* (см. Приложение 4). В отдельных репродукциях и полевых повторностях отмечаются генотипы (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш (253 и 387 е. а. в 50 % исследованных образцов) и Жетысу × *T. militinae* (254–285 е. а. в 50 % образцов); в единичных образцах высокие значения зафиксированы для генотипов Стекловидная 24 × *T. timopheevii* (326 е. а.) и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9 (297 е. а.). Стабильное высокое значение силы муки отмечено для форм Эритроспермум 350 × *T. kiharae* (213–259 е. а.) и Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* (205–259 е. а.).

Хлебопекарный анализ интрогрессивных озимых форм пшеницы позволил установить вариабельность по объему хлеба: от 500 мл для генотипа Эритроспермум 350 × *T. militinae* в урожае 2015 г. до 1005 мл для генотипа Жетысу × *T. timopheevii* и 990 мл для генотипа (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш в урожае 2016 г. (рис. 2). По среднеевропейским максимальным значениям в трех репродукциях выделяются также генотипы Жетысу × *T. timopheevii* (830 мл), (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш (819 мл) и Стекловидная 24 × *T. timopheevii* (818 мл). По минимальным значениям объема хлеба отмечены генотипы Эритроспермум 350 × *T. kiharae* (694 мл) и Безостая 1 × *Ae. cylindrica* (699 мл). В целом все образцы по объему хлеба относятся к классам «филлер» и «слабая» с преобладанием «филлера» до 50–67 %: (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, Жетысу × *T. timopheevii*, Стекловидная 24 × *T. timopheevii*, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9. По общей хлебопекарной оценке отмечен диапазон изменчивости от 2.0 баллов для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* в урожае 2014 г. до 4.34 балла для генотипа (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш в урожае 2016 г. и до 4.02 балла для генотипов Стекловидная 24 × *T. timopheevii* и Жетысу × *T. timopheevii*. Таким образом, зерно интрогрессивных

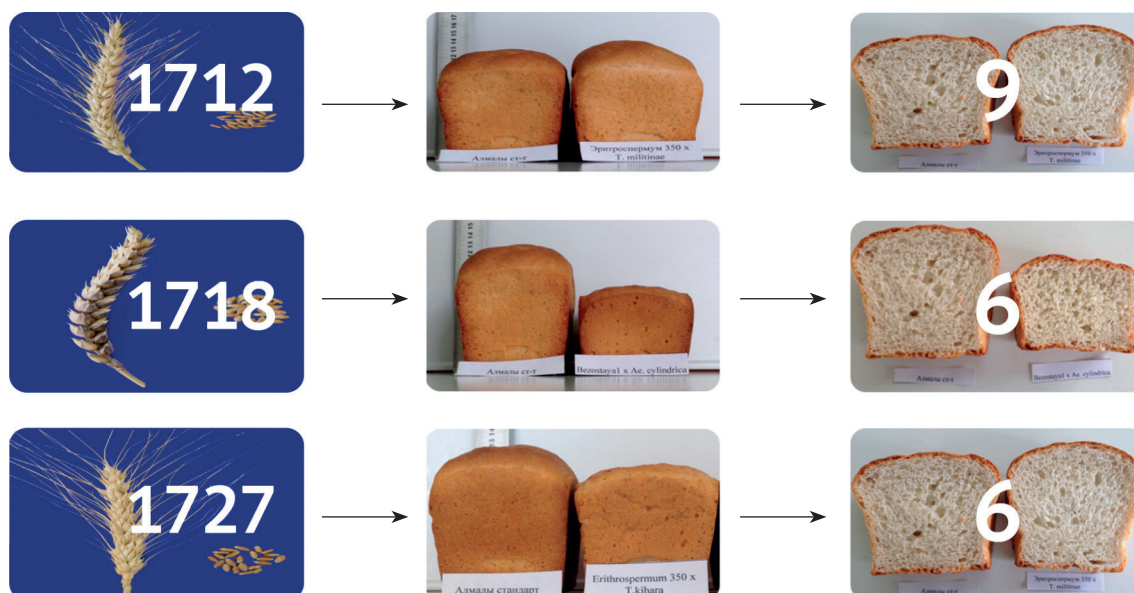


Fig. 2. Bread-making quality of flour obtained from winter wheat introgression forms with reference to cv. Almaly as compared to that predicted from Payne's score of HMW glutenin subunits (6 and 9 points).

синтетических форм вполне пригодно для переработки в муку. По физическим свойствам муки, теста, хлебопекарным показателям образцы сопоставимы с уровнем стандартов классов «ценная» и «филлер».

Интрогрессивные формы озимой мягкой пшеницы исследованы в двух репродукциях по составу глютенина и глиадина. Разнообразие субъединиц, кодируемых 1А хромосомой, обнаружено в пределах культурных форм (2*, 1 и 0). У родительских сортов в основном отмечена субъединица 2*, как и для *T. timopheevii* и *T. militinae* (Приложение 5).

По 1В хромосоме отмечены стандартно высококачественные субъединицы – «7+9» и «7+8»; низкокачественные – «7*» и «6+8»; достаточно редкие в генофонде – субъединица «21+8»; практически не встречающиеся – «6» (вкупе с «7+9»). По 1D хромосоме интрогрессивные формы характеризуются двумя основными субъединицами: «5+10» и «2+12», для форм с участием *T. kiharae* отмечена субъединица «4+10», а для генотипа Безостая 1 × *Ae. cylindrica* – «3+12». Для образцов Жетысу × *T. militinae*, Безостая 1 × *Ae. cylindrica*, Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* и Эритроспермум 350 × *T. kiharae* отмечен полиморфизм по 1В/1R транслокации.

Только шесть генотипов интрогрессивных форм из двенадцати отличались гомогенностью и идентичностью в обеих репродукциях (см. Приложение 5): (Безостая 1 × *Ae. triaristata*) × Карлыгаш, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4, Эритроспермум 350 × *T. militinae* и ПЭГ × Комсомольская 1 с прогнозом высокого качества по шкале Райне (9 баллов), за исключением линий (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-6 и (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-4 (5 баллов).

Ряд генотипов характеризуется неоднородностью по составу субъединиц, которая по вкладу в качество в целом не влияет на прогнозную оценку: Стекловидная 24 × *T. militinae*

варьирует по 1В по субъединицам «7+8» или «7+9», но общий прогноз 10 или 9 баллов. Генотип Стекловидная 24 × *Ae. cylindrica* варьирует по 1В хромосоме («7*» и «21+8») с прогнозно низкой оценкой 6 баллов, как и генотип Безостая 1 × *Ae. cylindrica* (6/5 баллов).

Сорта озимой мягкой пшеницы, использованные в скрещиваниях, характеризуются ценными аллелями в отношении качества (9 и 10 баллов по шкале Райне). Идентификация, а следовательно, и прогноз качества зерна по диким сородичам затруднительны ввиду резкого отличия от культурного генофонда и полиморфизма исходных образцов. Интрогрессивные формы озимой мягкой пшеницы ранжированы по прогнозной оценке шкалы Райне от 5 до 10 баллов генетически потенциального качества. Фенотипическая реализация согласно технологической оценке позволяет отнести только небольшую часть генотипов (до 18 %) к классу «сильная» по признакам качества клейковины и силы муки (Приложение 6).

Таким образом, интрогрессивные формы озимой пшеницы по технологической оценке хлебопекарного типа относятся в основном к классам «ценная» и «филлер», по силе муки и объему хлеба – к классу «слабая». При этом, согласно анализу состава ВМС глютенина и 1В/1R транслокации, примерно 60 и 86 % от всех образцов прогнозируются как класс «сильная» (9–10 баллов по шкале Райне), т. е. состав глютенина не объясняет всех различий в технологической оценке качества зерна.

Анализ муки по содержанию клейковины методом ИСО (отмывание соевым раствором), предполагающий состав клейковины из технологически значимых белков (глиадина и глютенина), выявил ее уровень от 28.5 % для генотипа Эритроспермум 350 × *T. militinae* до 39.6 % для генотипа Жетысу × *T. militinae*. При этом качество клейковины первой группы (класс «сильная») характерно для генотипов Эритроспермум 350 × *T. militinae*, (Безостая 1 × *T. militinae*) × *T. militinae*-9.

По физическим свойствам муки и теста интрогрессивные формы варьируют по разжижению теста на уровне 80–170 е. ф., т.е. на уровне классов пшеницы «филлер» и «слабая», с лучшим значением как по разжижению, так и по валориметрической оценке для генотипов Безостая 1 × *Ae. triaristata* и Эритроспермум 350 × *T. militinae*. Хлебопекарная оценка показывает, что из муки зерна интрогрессивных форм выпекают хлеб, объем которого сопоставим с таковым из зерна современных сортов, в том числе превышает сорта-стандарты Алмалы (720–760 мл) и Карахан (800 мл), по внешнему виду, пористости хлеба, объему и общей оценке. По твердозерности дикие сородичи и интрогрессивные формы характеризовались в основном как средне- и твердозерные (52–93 ед. SKCS). Образцы, выделенные по урожайности и устойчивости к болезням, классифицированы по требованиям к хлебопекарным пшеницам.

По высоко- и низкомолекулярным субъединицам глютеина отмечен полиморфизм отдельных интрогрессивных форм как возможность отбора и гомозиготизации методом дигаплоидизации, в том числе межвидовых и межродовых гибридов (Yerzhebaeva, Abugaliev, 2016), многих полиморфных сортов зерновых в СНГ (Shavrukov et al., 2014; Nurpeissov et al., 2015; Turuspekov et al., 2016) по результатам их исследований с использованием различных типов маркеров.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abugaliyeva A., Chudinov V., Morgounov A., Kozhakhmetov K. Using wild relatives for creating disease-resistant spring wheat varieties. Proc. 13th Int. Wheat Genetics Symposium. Austria, Tulln, 23–28 April, 2017;217.
- Abugaliev A.I., Peña-Bautista R.J. Grain quality of spring and winter wheat in Kazakhstan. Asian Australas. J. Plant Sci. Biotechnol. 2010;4:87-90.
- Alvarez J.B., Guzman C. Interspecific and intergeneric hybridization as a source of variation for wheat grain quality improvement. Theor. Appl. Genet. 2018;131:225. DOI 10.1007/S00122-017-3042-x.
- Aykut Tonk F., İlker E., Tosun M. A study to incorporate high protein content from tetraploid wheat (*T. turgidum dicoccoides*) to hexaploid wheat (*T. aestivum vulgare*). Turk. J. Field Crops. 2010;15(1):69-72.
- Brown-Guedira G.L., Guedira M., Fritz A.K., Martin T.J., Chung O.K., Lockhart G.L., Seabourn B.W., Gill B.S., Cox T.S. Notice of release of KS04WGRC49 hard winter wheat germ plasm with unique glutenin and gliadin proteins. Annu. Wheat Newsl. 2005;51:190.
- Cox T.S., Bequette R.K., Bowden R.L., Sears R.G. Grain yield and breadmaking quality of wheat lines with the leaf rust resistance gene *Lr41*. Crop Sci. 1997;37:154-161.
- Cox T.S., Sears R.G., Bequette R.K. Use of winter wheat × *Triticum tauschii* backcross populations for germplasm evaluation. Theor. Appl. Genet. 1995a;90:571-577.
- Cox T.S., Sears R.G., Bequette R.K., Martin T.J. Germplasm enhancement in winter wheat × *Triticum tauschii* backcross populations. Crop Sci. 1995b;35:913-919.
- Cox T.S., Wu J., Wang S., Cai J., Zhong Q., Fu B. Comparing two approaches for introgression of germplasm from *Aegilops tauschii* into common wheat. Crop J. 2017;5:355-362. DOI 10.1016/j.cj.2017.05.006.
- Eagles H.A., McLean R.B., Eastwood R.F., Appelbee M.-J., Cane K., Martin P.J., Wallwork H. High-yielding lines of wheat earing *Gpc-B1* adapted to Mediterranean-type environments of the south and west of Australia. Crop Pasture Sci. 2014;65(9):854-861. DOI 10.1071/cpl4106.
- Eggert K., Wieser H., Pawelzik E. The influence of *Fusarium* infection and growing location on the quantitative protein composition of (part I) emmer (*Triticum dicoccum*). Eur. Food Res. Technol. 2010;230:837-847.
- Gill B.S., Friebe B., Raupp W.J., Wilson D.L., Cox T.S., Sears R.G., Brown-Guedira G.L., Fritz A.K. Wheat Genetics Resource Center: the first 25 years. Adv. Agron. 2006;89:73-136.
- Hsam S.L.K., Kieffer R., Zeller F.J. Significance of *Aegilops tauschii* glutenin genes on bread-making properties of wheat. Cereal Chem. 2001;78:521-525.
- Hussein H.A., Ebtissam H.A.H., El-Sayed O.E., Al-Ansary A.M.F., Khatib S.A., Sally A.A.R. Inter specific crosses and marker assisted selection for improving the nutritional value of Egyptian wheat cultivars. Int. J. Agric. Res. 2014;9(3):119-135. DOI 10.3923/ijar.2014.113.135.
- Imtiaz M., Ogonnaya F.C., Oman J., van Ginkel M. Characterization of QTLs controlling genetic variation for pre-harvest sprouting in synthetic backcross derived wheat lines. Genetics. 2008;178:1725-1736.
- Khelestina E.K., Pshenichnikova T.A., Usenko N.I., Otmahova Yu.S. Prospective applications of molecular genetic approaches to control technological properties of wheat grain in the context of the “grain–flour–bread” chain. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektzii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2016;20(4):511-527. (in Russian)
- Klindworth D.L., Hareland G.A., Elias E.M., Faris J.D., Chao S., Xu S.S. Agronomic and quality characteristics of two new sets of Langdon durum–wild emmer wheat chromosome substitution lines. J. Cereal Sci. 2009;50:29-35. DOI 10.1016/j.jcs.2009.02.003.
- Kozhakhmetov K.K., Abugaliev A.I. Using gene fund of wild relatives for common wheat improvement. Int. J. Biol. Chem. 2014;41(2):41-43.
- Kozhakhmetov K., Abugaliev A.I. Selektionnoe dostizhenie: pshe-nitsa myagkaya ozimaya “Erpreudo-24” [Breeding achievement: common winter wheat “Erpreudo-24”]. Patent RF, no. 784, 2017. (in Russian)
- Kozhakhmetov K., Abugaliev A.I., Bashabaeva B.M. Selektionnoe dostizhenie: pshe-nitsa myagkaya ozimaya “Preffer-22” Breeding achievement: common winter wheat “Erpreudo-22”]. Patent RF, no. 783, 2017. (in Russian)
- Kozhakhmetov K., Abugaliev A.I., Savin T.V., Bashabaeva B.M. Sposob sozdaniya samofertil’nykh alloplazmaticheskikh euploidnykh i aneuploidnykh liniy myagkoy pshe-nitsy [Method of creating self-fertile alloplasmatic euploid and aneuploid common wheat lines]. Patent RF, no. 31891, 2017. (in Russian)
- Kunert A., Naz A.A., Dedek O., Pillen K., Leon J. AB-QTL analysis in winter wheat: I. Synthetic hexaploid wheat (*T. turgidum* ssp. *dicoccoides* × *T. tauschii*) as a source of favourable alleles for milling and baking quality traits. Theor. Appl. Genet. 2007;115:683-695.
- Lagudah E.S., Macritchie P., Halloran G.M. The influence of high-molecular-weight subunits of glutenin from *Triticum tauschii* on flour quality of synthetic hexaploid wheat. J. Cereal Sci. 1987;5:129-138.
- Lan X.J., Yen C. An amphidiploid derived from a Chinese landrace of tetraploid wheat, Ailanmai, crossed with *Aegilops tauschii* native to China with reference to its utilization in wheat breeding. J. Sichuan Agric. Univ. 1992;10:581-585.
- Li J., Wan U.S., Yang W.Y. Synthetic hexaploid wheat enhances variation and adaptive evolution of bread wheat in breeding processes. J. Syst. Evol. 2014;52:735-742.
- Mackie A.M., Sharp P.J., Lagudah E.S. The nucleotide and derived amino acid sequence of a HMW-glutenin gene from *Triticum tauschii* and comparison with those from the D-genome of bread wheat. J. Cereal Sci. 1996;24:73-78.
- Mishra V.K., Gupta P.K., Arun B., Chand R., Vasistha N.K., Vishwakarma M.K., Yadav P.S., Joshi A.K. Introgression of a gene for high grain protein content (*Gpc-B1*) into two leading cultivars of wheat in

- Eastern Gangetic Plains of India through marker assisted back-cross breeding. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 2015;7(8):292-300. DOI 10.5897/JPCS2015.0514.
- Morgunov A.I., Gomez-Becerra H.F., Abugaliyeva A.I., Dzhunusova M., Yessimbekova M.A., Muminjanov H., Zelenskiy Y., Ozturk L., Cakmak Y. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica*. 2007;155:193-203.
- Nurpeissov M., Abugaliyeva A., Langdon T. Genetic identification of Kazakhstan OAT varieties. *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*. 2015;12(3):2227-2233. DOI 10.13005/bbra/1895.
- Ogbonnaya F.C., Abdalla O., Mujeib-Kazi A., Kazi A.G., Xu S.S., Gosman N., Lagudah E.S., Bonnett D., Sorrells M.E., Tsujimoto H. Synthetic hexaploids: harnessing species of the primary gene pool for wheat improvement. *Plant Breed. Rev.* 2013;37:35-122. DOI 10.1002/9781118497869.ch2.
- Peruanskiy Yu.V., Abugaliyeva A.I., Savin V.N. Metody biokhimicheskoy otsenki kollektzionnogo i selektsionnogo materiala. Pod red. Yu.V. Peruanskogo [Peruanskiy Yu.V. (Ed.). Methods for biochemical evaluation of collection and breeding material]. Almaty, 1996. (in Russian)
- Peruanskiy Yu.V., Abugaliyeva A.I., Tazhibaeva T.L. Sposob opredeleniya ustoychivosti genotipov pshenitsy k stressovym faktoram [Method for determining the resistance of wheat genotypes to stress factors]. Patent of the Kazakhstan Republic no. 8174, 1999. (in Kazakhstan)
- Savin V.N., Abugaliyeva I.A., Abugaliyeva A.I. Analytical research optimization in agriculture. *Doklady Rossiyskoy Akademii Selskokhozyaystvennykh Nauk = Proceedings of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 1998;2:13-15. (in Russian)
- Savin T.V., Abugaliyeva A.I., Chakmak I., Kozhakhmetov K.K. Mineral composition of wild relatives and introgressive forms in wheat selection. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(1):88-96. (in Russian)
- Savin T.V., Abugaliyeva A.I., Kozhakhmetov K.K. Study of wild wheat relatives with regard to Fe and Zn contents with reference to cultivated forms and their hybrids. *Rol' Vavilovskoy kollektsii geneticheskikh resursov rasteniy v menyayushchemsya mire: Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Role of the Vavilov Collection of Plant Genetic Resources in the Changing World"]*. St. Petersburg, 2009;220-224. (in Russian)
- Shavrukov Yu., Suchecki R., Eliby S., Abugaliyeva A., Kenenbaev S., Langridge P. Application of next-generation sequencing technology to study genetic diversity and identify unique SNP markers in bread wheat from Kazakhstan. *BMC Plant Biol.* 2014;14:258. DOI 1471-2229/14/258.
- Shchukina L.V., Chistyakova A.K., Morozova E.V., Pshenichnikova T.A., Simonov A.V. Influence of introgressions from wild relatives to common wheat on the variation in technological parameters of grain and flour. *Doklady i soobshcheniya XI Mezhdunarodnoy genetiko-selektsionnoy shkoly-seminara "Sovremennoe sostoyanie i prioritetye napravleniya razvitiya genetiki, epigenetiki, seleksii i semenovodstva sel'skokhozyaystvennykh kul'tur"* [Proceedings of the 11th Int. Genetic and Breeding School "Current state and top directions in crop genetics, epigenetics, breeding, and seed farming"]. Novosibirsk, 2012;304-311. (in Russian)
- Sinityn S.S., Zelova L.A. Mass-scale double assay of wheat flour strength in grain weights from 0.5 to 0.15 g. *Sibirskiy Vestnik Selskokhozyaystvennoy Nauki = Siberian Herald of Agricultural Sciences* 1978;3:39-44. (in Russian)
- Tabbata F., Lewis S., Vouilloz J.P., Ortega M.A., Kade M., Abbate P.E., Barneix A.J. Effects of the *Gpc-B1* locus on high grain protein content introgressed into Argentinean wheat germplasm. *Plant Breed.* 2013;132:48-52. DOI 10.1111/pbr.12011.
- Tang Y.I., Yang W.Y., Tian J.C., Li J., Chen F. Effect of HMW-GS 6+8 and 1.5+10 from synthetic hexaploid wheat on wheat quality traits. *Agric. Sci. China*. 2008;7:1161-1171.
- Turuspekov Y., Sariev B., Chudinov V., Sereda G., Tokhetova L., Ortaev A., Tsygankov V., Doszhanov M., Volis S., Abugaliyeva S. Genotype × environment interaction patterns for grain yield of spring barley in different regions of Kazakhstan. *Russ. J. Genetics*. 2013;49(2):196-205.
- Uauy C., Distelfeld A., Fahima T., Blechl A., Dubcovsky J. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science*. 2006;314:1298-1301.
- Vishwakarma M.K., Mishra V.K., Gupta P.K., Yadav P.S., Kumar H., Joshi A.K. Introgression of the high grain protein gene *Gpc-B1* in an elite wheat variety of Indo-Gangetic Plains through marker assisted backcross breeding. *Curr. Plant Biol.* 2014;1:60-67. DOI 10.1016/j.cpb.2014.09.003.
- Yerzhebayeva R., Abugaliyeva A. Anther Culture of Synthetic Wheat Obtained by Distant Hybridization. *Conf. Plant Cells in vitro: Theory and Practice*. Vienna, Austria, 8–9 February, 2016;41.