



Величина и стабильность урожайности современного селекционного материала яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) из России и Казахстана

П.Н. Мальчиков¹✉, М.А. Розова², А.И. Моргунов³, М.Г. Мясникова¹, Ю.И. Зеленский⁴

¹ Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.М. Тулайкова, п. г. т. Безенчук, Самарская область, Россия

² Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия

³ Представительство Международного центра улучшения кукурузы и пшеницы в Центральной Азии и Закавказье (CIMMYT), Анкара, Турция

⁴ Представительство Международного центра улучшения кукурузы и пшеницы в Центральной Азии и Закавказье (CIMMYT), Астана, Казахстан

Определение адаптивных реакций селекционного материала, полученного в различных селекционных центрах, позволяет при необходимости целенаправленно корректировать эти свойства. В связи с этим в 2015–2017 гг. были изучены 42 современные селекционные линии твердой пшеницы из восьми учреждений России и Казахстана в сравнении с историческим стандартом – Безенчукской 139 в системе 16-17 и 18 КАСИБ-ЯТП. Полевые эксперименты и учет урожая в каждой экологической точке были организованы по единой схеме. Для решения поставленных задач применялись двухфакторный дисперсионный анализ, методики оценки адаптивности, кластерный анализ и метод главных компонент. В результате исследований установлено: 1) значимое влияние генотипа и генотип-средовых взаимодействий (суммарно 15.8–23.5 % от общей дисперсии) на изменчивость урожайности; 2) генотип-средовые взаимодействия проявили линейный характер и не вносили дестабилизирующего эффекта; 3) все изученные генотипы распределялись по трем кластерам, первый образовали сорта локального значения, третий – широкого ареала, второй объединил генотипы с промежуточными свойствами; 4) селекционные центры ФГБНУ Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий (ФАНЦА) и ФГБНУ НИИ сельского хозяйства Юго-Востока преимущественно производят сорта локального значения, Самарский НИИ сельского хозяйства – сорта широкого ареала; 5) устойчивое относительно исторического стандарта Безенчукская 139 преимущество по величине средней урожайности, рассчитанной по данным экологических пунктов, отмечено только для сортов Самарского НИИСХ; 6) сорта всех селекционных учреждений по стабильности и отзывчивости не имеют устойчивых изменений относительно Безенчукской 139, что объясняется незавершенностью селекционного процесса по этим свойствам и подтверждает целесообразность функционирования программы КАСИБ; 7) тренд увеличения урожайности относительно Безенчукской 139 в условиях локального испытания имел более устойчивые тенденции, наибольший прогресс отмечен в Алтайском НИИСХ (135.4 и 163.2 % к Безенчукской 139), что можно объяснить высокой эффективностью селекции по созданию сортов локального значения в этом селекционном центре.

Ключевые слова: твердая пшеница; селекция; урожайность; адаптивность; стабильность; отзывчивость; сорт; селекционная линия; кластер.

Yield performance and stability of modern breeding stock of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) from Russia and Kazakhstan

P.N. Mal'chikov¹✉, M.A. Rozova², A.I. Morgunov³, M.G. Myasnikova¹, Yu.I. Zelensky⁴

¹ Samara Research Institute of Agriculture named after N.M. Tulaikov, Bezenchuk, Samara region, Russia

² Federal Altai Scientific Center of Agro-BioTechnologies, Barnaul, Russia

³ International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Ankara, Turkey

⁴ International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Astana, Kazakhstan

Identification of adaptive responses of breeding material, developed in different breeding centers, helps to purposefully correct these traits where it is necessary. Thus, 42 modern breeding lines from eight institutions of Russia and Kazakhstan were studied in comparison with the historical standard Bezenchukskaya 139 in trials of 16-17 and 18 KASIB-SDW (Kazakhstan-Siberian net for wheat improvement, spring durum wheat) in 2015–2017. Field experiments and yield measurements in each ecological site were similar. To solve these tasks of the experiment, two-factor ANOVA, methods for adaptability assessment cluster analysis and principle component method were applied. As a result, it was established that 1) genotype and genotype – environment interaction (overall 15.8–23.5 % of total dispersion) had significant effect on yield variability; 2) genotype – environment interactions were of linear nature and had no destabilizing effect; 3) all the genotypes tested can be distributed in three clusters, the first one for locally adapted varieties, the third for varieties of a wide area, the second included genotypes with intermediate characteristics; 4) breeding centers of the Federal Altai Scientific Centre of Agro-Biotechnologies and of the Research Institute of Agriculture of South-East produced predominantly varieties of local importance, the Samara Research Institute of Agriculture – varieties of wide area; 5) a stable trend of increased mean yield compared to historical standard Bezenchukskaya 139 over ecological sites was observed only for Samara varieties; 6) varieties of all the breeding centers had no stable difference from Bezenchukskaya 139 concerning stability and responsive-

ness, which can be explained by an incomplete breeding process for these parameters and confirms the importance of the KASIB program; 7) a trend of yield increase compared to Bezenchukskaya 139 under testing in definite local environments had more stable parameters with the largest progress observed in the Altai Research Institute of Agriculture (135.4 and 163.2 % to Bezenchukskaya 139), which can be explained by a high efficiency of breeding of locally adapted varieties in the breeding center.

Key words: durum wheat; breeding; yield; adaptability; stability; responsiveness; variety; breeding line; cluster.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

Мальчиков П.Н., Розова М.А., Моргунов А.И., Мясникова М.Г., Зеленский Ю.И. Величина и стабильность урожайности современного селекционного материала яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) из России и Казахстана. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018;22(8):939-950. DOI 10.18699/VJ18.436

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mal'chikov P.N., Rozova M.A., Morgunov A.I., Myasnikova M.G., Zelensky Yu.I. Yield performance and stability of modern breeding stock of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) from Russia and Kazakhstan. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(8):939-950. DOI 10.18699/VJ18.436

Решение проблемы повышения уровня и стабильности урожайности в процессе селекции сопряжено с преодолением ряда ограничений, возникающих в связи селекционным улучшением двух генетических систем одновременно – отзывчивости на благоприятные условия и устойчивости к стрессовым факторам. Установлено, что стабильность урожайности определяется устойчивостью к стрессам разной этиологии и характерна для сортов широкого ареала. Сорта, адаптированные к конкретным условиям среды, в том числе и к высокопродуктивным, как правило, узкоспециализированы, имеют локальное значение (Tollenaar, Lee, 2002; Duvick et al., 2004). В селекционной практике эти два направления реализуются в зависимости от широты предполагаемого ареала распространения создаваемых сортов. При этом необходимо учитывать, что варьирование урожайности генотипов по средам во многом определяется взаимодействием генотип–среда (GE). С одной стороны, селекционер должен стремиться к снижению величины GE и увеличению эффектов генотипа, обеспечивающих устойчивое формирование признака в разных средах. С другой стороны, GE открывает возможности отбора генотипов, адаптированных к определенному месту и преобладающим условиям окружающей среды этого места (эксплуатация конкретных адаптаций) (Lin, Binns, 1991; Ceccarelli, 1996). Тем не менее в большинстве экологических регионов селекционеры нацелены на разработку сортов с устойчивой урожайностью и широкой адаптацией к разнообразным условиям среды (Lin, Binns, 1988; Evans, 1993), что преимущественно связано с широкой амплитудой вариации климатических факторов по годам. Идеальный генотип должен хорошо работать как в течение многих лет в одном месте (определенных средовых условиях), так и в широком диапазоне сред, формируемых внешними условиями в разных местностях (Romagosa, Fox, 1993).

Предположение о том, что современные сорта пшеницы более восприимчивы к изменениям окружающей среды, чем ландрасы и сорта предшествующих этапов селекции, высказывалось неоднократно (Батыгин, 1995; Calderini, Slafer, 1998; Fufa et al., 2005). В то же время в ряде публикаций приведены данные, показывающие превалирование вектора засухоустойчивости в процессе создания высоко-

продуктивных сортов (Кумаков, 1985; Васильчук, 2001). В работе (De Vita et al., 2010) представлены результаты изучения 65 генотипов твердой пшеницы разных периодов использования (ландрасы, старые селекционные и новые сорта различных этапов выпуска и перспективные селекционные линии) в ряде сред на территории Италии, где показано, что стратегия селекции, принятая в течение последних десятилетий, привела к уменьшению эффектов взаимодействия генотип–среда и отбору генотипов с лучшей стабильностью в широком диапазоне сред. Некоторые современные генотипы превосходят по урожаю старые сорта во всех тестовых средах, где в соответствии с концепцией «биологической» или «статистической» стабильности необходимо развитие свойств как сильной приспособляемости к стрессовым факторам, так и повышенной отзывчивости на благоприятные условия среды. S. Rajaram (2003) приводит убедительные данные о возможности создания высокоурожайных сортов, адаптированных к стрессовым факторам, подтвержденные другими исследованиями CIMMYT (Braun et al., 1996; Crossa et al., 2014).

В России и Казахстане селекция яровой твердой пшеницы прошла несколько этапов. В настоящее время состояние сортового разнообразия в районировании по регионам отчетливо демонстрирует превалирование сортов, созданных региональными селекционными учреждениями. В связи с этим правомерно предположение о доминировании в современном селекционном процессе адаптивных свойств локального значения. Вместе с тем в предшествующие периоды селекции наблюдалось распространение сортов монополистов (Мелянопус 69, Харьковская 46, Безенчукская 139), т. е. сортов с высоким уровнем стабильности урожайности в широком диапазоне средовых условий. Понимание динамики адаптивных реакций сортов твердой пшеницы в процессе их создания в различных селекционных центрах позволяет при необходимости целенаправленно корректировать эти свойства. Для экспериментального решения задачи по определению эволюционных тенденций адаптивности в различных регионах за определенный период селекции необходимо иметь общую «точку отсчета» не только во времени, но и в биологическом смысле. В этом случае необходим сорт,

который является историческим сортом для всех регионов и может выполнять функции общего стандарта. В качестве такого сорта целесообразно использовать Безенчукскую 139. Этот сорт в 80-х годах XX века был широко районирован от Поволжья до Казахстана и Сибири, т.е. в регулярных сортоиспытаниях стабильно превышал по урожайности зерна стандартные сорта в этих регионах. Очевидно, что в тот период сорт Безенчукская 139 можно было классифицировать как сорт широкого ареала.

Цель исследований заключалась в том, чтобы на основе данных эколого-географических испытаний генотипов (современных селекционных линий) твердой пшеницы научных учреждений КАСИБ (Казахстанско-Сибирская сеть по улучшению яровой пшеницы) дифференцировать селекционный материал по параметрам адаптивности, стабильности и селекционной ценности по урожайности зерна и определить эволюционные изменения по этим параметрам в генофонде различных селекционных центров относительно исторического сорта Безенчукская 139.

Материалы и методы

Объектами исследований были сорта яровой твердой пшеницы 16-17 и 18 КАСИБ-ЯТП, поступившие от учреждений-соисполнителей. Цикл 16-17 КАСИБ (выполнен в 2015–2016 гг.) включал 22 селекционные линии и сорта: Каргала 66, Каргала 1412, Каргала 1514 (Актюбинская СХОС, г. Актюбинск), Шарифа, Гордеиформе 950/99 (Карабалыкская СХОС, пос. Карабалык), Лавина, Дамсинская юбилейная, Шортандинская 256 (НПЦЗХ, г. Шортанды), Гордеиформе 18567-6, Гордеиформе 18585-2 (Казахский НИИ земледелия и растениеводства, пос. Алмалыбак), Гордеиформе 719, Гордеиформе 723, Гордеиформе 748 (ФГБНУ ФАНЦА, г. Барнаул), Гордеиформе 00-178-4, Гордеиформе 01-115-5, Гордеиформе 03-20-18 (Сибирский НИИСХ, г. Омск), Елизаветинская, Валентина (НИИСХ Юго-Востока, г. Саратов), Леукурум 1307Д-54, Леукурум 1469Д-21, Леукурум 1594Д-3 (Самарский НИИСХ, пос. Безенчук), Безенчукская 139 (исторический сорт, общий стандарт) и три местных стандарта в каждом учреждении из раннеспелой, среднеспелой и позднеспелой групп. Цикл 18 КАСИБ (выполнен в 2017 г.) включал те же стандартные сорта (три местных стандарта и один общий – Безенчукская 139) и новые селекционные линии и сорта: Каргала 223, Каргала 228, Каргала 238 (Актюбинская СХОС), Линия 19003, Линия 19029 (Казахский НИИ земледелия и растениеводства), Гордеиформе 69-08-2, Гордеиформе 178-05-2 (НПЦЗХ, Казахстан), Гордеиформе 2264, Гордеиформе 2383, Линия 9-25-016 (Карабалыкская СХОС), Гордеиформе 829, Гордеиформе 864, Гордеиформе 881 (ФГБНУ ФАНЦА), Гордеиформе 04-76-5, Гордеиформе 05-12-7, Гордеиформе 05-42-12 (Сибирский НИИСХ), Леукурум 1429Д-10, Леукурум 1506Д-36, Гордеиформе 1591Д-21 (Самарский НИИСХ), Аннушка, Луч 25 (НИИСХ Юго-Востока).

Изучение сортов 16-17 КАСИБ в 2015–2016 гг. проведено в пяти экологических пунктах: Актюбинск, Карабалык, Барнаул, Омск, Безенчук. Эксперименты 18 КАСИБ выполнены в 2017 г. в девяти экологических пунктах: Актюбинск, Карабалык, Алматы× (два пункта), Шортанды, Барнаул, Омск, Безенчук, Саратов.

Размещение делянок, наблюдения и учет урожая в каждой экологической точке были организованы по единой схеме. Предшественник – чистый пар, учетная площадь делянки 5–10.0 м², повторность 2–3-кратная. Размещение делянок в блоках – рендомизированное. Посев во всех экопунктах проводился в оптимальные агротехнические сроки. Уборка зерна осуществлялась при достижении полной спелости зерна, данные по урожайности пересчитывали на 14.0 % влажность.

Условия среды как внешние фоны формирования урожая по пунктам и годам в цикле 16-17 КАСИБ (2015–2016 гг.) можно условно распределить на три группы: 1) благоприятные – Карабалык, 2016 г.; Барнаул, 2015 г.; Омск, 2015 г. – со средней урожайностью 4.62, 3.82 и 3.30 т/га соответственно; 2) средние по продуктивности и негативным эффектам лимитирующих факторов среды – Барнаул, 2016 г.; Карабалык, 2015 г.; Омск, 2016 г. – с урожайностью 2.70, 2.69, 2.13 т/га соответственно; 3) жесткие с наибольшей концентрацией стрессовых факторов имели место в Актюбинске и Безенчуке в 2015–2016 гг., где урожайность варьировала от 1.16 до 1.88 т/га. В цикле 18 КАСИБ (2017 г.) условия среды по всем пунктам, кроме Актюбинска и Карабалыка, были благоприятными и очень хорошими. В Актюбинске на фоне хороших осенне-зимних запасов влаги в почве наблюдался сильный дефицит осадков в период вегетации. В Карабалыке на фоне сильной засухи в период посев–всходы и в начале вегетации отмечено изреживание стеблестоя посевов по отдельным сортам. Средняя урожайность в Актюбинске составила 1.25 т/га в Карабалыке – 1.56 т/га.

Оценку сортов провели по методу А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой (1997), основанному на испытании генотипов в различных средах и применении двухфакторного дисперсионного анализа. Метод дает возможность определить общую и специфическую адаптивную способность генотипов, их стабильность и селекционную ценность. Общая адаптивная способность характеризует среднее значение признаков в различных условиях среды ($OAC = x_i - u$, где x_i – среднее значение признака i сорта во всех средах; u – среднее значение признака в эксперименте по всем сортам), специфическая адаптивная способность (SAC – отклонение от OAC в конкретной среде ($\sigma^2 SAC_i = \sum(d_k + vd_{ik})^2 / (m-1)\sigma^2 / m$, где m – число сред. Чем меньше значение дисперсии SAC , тем слабее генотип реагирует на изменения среды, тем выше его стабильность. Для сравнения результатов опытов с различным набором сортов, культур и средовых условий, применяется показатель относительной стабильности генотипа $s_{gi} = \sigma SAC_i / (u + OAC_i) \times 100$ %. Отношение $l_{gi} = \sigma_{(G \times E)gi}^2 / \sigma^2 SAC_i$ характеризует нелинейность ответа генотипа на среду. Если $l_{gi} \rightarrow 1$, генотип нелинейно реагирует на большинство сред, при $l_{gi} \rightarrow 0$ преобладает линейная реакция генотипа на среду. Для понимания сущности взаимодействия GE, при интерпретации дисперсии $\sigma_{(G \times E)gi}^2$ применяется коэффициент компенсации K_{gi} ($K_{gi} = \sigma^2 SAC_i / \sigma^2 SAC'$, где $\sigma^2 SAC' = \sum d_k^2 / (m-1) - (m-1) \times \sigma^2 / m$), который показывает относительный вклад генотипа и среды в дисперсию взаимодействия. При $K_{gi} \rightarrow 0$

преобладают эффекты компенсации взаимодействия GE, $K_{gi} = 1$ – эффекты компенсации и дестабилизации равны, $K_{gi} > 1$ – эффекты взаимодействия генотип–среда совпадают по знаку с эффектами среды, варiances $\sigma^2 SAC_i$ возрастает с дестабилизирующим эффектом. В качестве селекционного критерия, оценивающего весь комплекс адаптивных реакций, применяется параметр – селекционная ценность генотипа $СЦГ_i = u + OAC_i - p \times \sigma SAC_i$, учитывающий как продукционные возможности генотипа в среднем по всем средам, так и стабильность.

Для оценки адаптивных свойств сортов в этой работе были использованы показатели OAC_i , SAC_i , $100 - Sgi$ (параметр введен для упрощения интерпретации полученных данных, поскольку его большие абсолютные величины характеризуют возрастание устойчивости в отличие от аналогичного по смыслу параметра Sgi), $СЦГ_i$, рассчитанные по (Кильчевский, Хотылева, 1997), коэффициент регрессии генотипов на среду b_i (Eberhart, Russell, 1966) и параметр гомеостатичности, рассчитанный по формуле В.В. Хангильдина (1978): $Hom = X^2 / ((X_{max} - X_{lim}) \times \sigma)$, где X – среднее значение признака с учетом всех фонов, X_{max} – максимальное значение признака, X_{lim} – минимальное значение признака в опыте, σ – среднеквадратическое отклонение признака.

Кластеризация сортов по свойствам адаптивности (OAC_i , SAC_i , $100 - Sgi$, $СЦГ_i$, b_i , Hom) проведена на основе данных кластерного анализа, выполненного с применением пакета программ Agros 2.13 варианта Q-техники на персональном компьютере. В пакете реализован итерационный алгоритм, заключающийся в последовательном объединении объектов, наименее удаленных друг от друга. Разделение на кластеры проведено на основании значимости коэффициентов корреляции между компонентами кластерного анализа. Достоверность объединения сортов в кластеры подтверждена результатами дисперсионного анализа параметров адаптивности сортов. В качестве дополнительной процедуры группировки сортов был применен метод главных компонент. Целесообразность применения этого метода определяется двумя причинами: 1) подтверждение результатов кластерного анализа; 2) визуализация биплота в системе двух главных компонент более наглядно демонстрирует объединение сортов в группы.

Результаты и обсуждение

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа двух экспериментов (16-17 КАСИБ, 18 КАСИБ) показали значимые эффекты среды, генотипов и их взаимодействия (табл. 1). В обоих экспериментах преобладающий вклад в общую дисперсию урожайности вносили факторы среды. Наиболее значимое влияние условий среды имело место в первом эксперименте, что, видимо, связано с сильным проявлением лимитирующих факторов, действовавших на растения в отдельных опытах (год–пункт).

Уменьшение эффектов среды в опытах 18 КАСИБ относительно 16-17 КАСИБ на 7.6 % в абсолютных значениях сопровождалось увеличением (на 6.5 %) вклада в общее варьирование эффектов взаимодействия GE. Влияние генотипического фактора также возросло, но незначительно – на 1.1 %. Эта динамика может быть связана как с

изменением факторов среды, так и с реакцией различного сортового состава в двух экспериментах. Тем не менее значимое влияние генотипа и эффектов взаимодействия позволяет оценить адаптивность, стабильность, отзывчивость и селекционную ценность исследуемых сортов.

Незначительная часть неучтенных (случайных) факторов (Egor) объясняется тем, что их величина в системе двухфакторного дисперсионного анализа определяется дисперсией полевых повторений в каждом эксперименте. В обоих опытах варьирование данных полевых повторностей было значительно меньше дисперсии, определявшейся изменчивостью по годам, пунктам и сортам. Общая характеристика сортов 16-17 и 18 КАСИБ представлена в табл. 2 и 3. В обоих экспериментах, несмотря на значимые различия по l_{gi} и K_{gi} , оба параметра у всех сортов были ближе к нулевой отметке, что указывает на преобладание линейного ответа генотипов на изменение среды и отсутствие значимых дестабилизирующих эффектов, вызываемых совпадением по знаку вкладов в общее варьирование эффектов среды и GE взаимодействия, что предполагает схожую по направлению реакцию сортов на изменение среды.

Другие параметры в обоих экспериментах значительно изменялись в зависимости от свойств сортов и особенностей их взаимодействия со средой. Для распределения сортов, происходящих из различных селекционных центров, по группам, объединяющим сорта с близкими характеристиками продуктивности, адаптивности и стабильности, к массиву данных по OAC_i , σSAC_i , $100 - Sgi$, $СЦГ_i$, b_i , Hom были применены кластерный анализ и метод главных компонент. По результатам кластерного анализа, в обоих экспериментах выделено по три кластера (внутрикластерные коэффициенты корреляции составили в эксперименте 16-17 КАСИБ 0.634...0.995 и в 18 КАСИБ 0.529...0.997), и по два сорта в обоих экспериментах оказалось вне кластеров. Эти результаты были подтверждены методом главных компонент, которые представлены в виде биплота на основе первых двух главных компонент с долей от общей дисперсии в первом эксперименте – 99.9 %, во втором – 99.7 % (рис. 1 и 2). Вне кластеров оказались в первом эксперименте (16-17 КАСИБ) сорт Гордеиформе 18567-6 (Казахский НИИ земледелия) и усредненные значения местных стандартов из раннеспелой группы, во втором эксперименте (18 КАСИБ) – линия 19003 (Карабалыкская СХОС) и Луч 25 (НИИСХ Юго-Востока).

Первый кластер 16-17 КАСИБ объединил десять сортов: три – селекции Алтайского НИИСХ (Гордеиформе 719, Гордеиформе 748, Гордеиформе 728), три – селекции Научно-производственного центра зернового хозяйства (НПЦЗХ) (Лавина, Дамсинская юбилейная, Шортандинская 256), по одному сорту из НИИСХ Юго-Востока (Елизаветинская), Сибирского НИИСХ (Гордеиформе 00-178-04), Актюбинской СХОС (Каргала 1412) и исторический стандарт Безенчукская 139. Во второй кластер вошло четыре сорта – по одному из НИИСХ Юго-Востока (Валентина), Актюбинской СХОС (Каргала 1514), Карабалыкской СХОС (Шарифа) и Сибирского НИИСХ (Гордеиформе 03-02-18). Третий кластер объединил девять сортов: три – селекции Самарского НИИСХ (Леукурум 1307-54, Леукурум 1469-21, Леукурум 1594-3), по одному из Казах-

Table 1. Grain yield variation in KASIB 16-17 and 18 varieties in 10 and 9 test trials in Russia and Kazakhstan, respectively

Source of variation	KASIB 16-17				KASIB 18			
	DF	MS	SS	Percentage in overall variation	DF	MS	SS	Percentage in overall variation
E	9	6374.7**	57372	83.8	8	5684.1**	45472	76.2
G	24	165.8**	3978	5.8	24	172.3**	4136	6.9
GE	216	31.7**	6852.3	10.0	192	51.5**	9883.5	16.6
Error	249	1.05	263	0.4	224	0.653	146.3	0.3

Notes: DF, degree of freedom, MS, mean square; SS, sum of squares; E,G, GE, effects of the environment, genotype, and genotype-environment interactions, respectively; Error, unaccounted dispersion. ** Fisher's significance level 1%.

Table 2. Adaptability and stability of varieties KASIB 16-17 studied in Russia and Kazakhstan in 2015–2016

Genotype	Adaptability and stability parameters								
	OAC_i	$\sigma^2(G \times E)_{gi}$	σCAC_i	S_{gi}	BVG_i	I_{gi}	K_{gi}	b_i	
Kargala 66	2.4	9.3	10.8	60.7	15.9	0.080	0.12	0.93	
Kargala 1412	-2.6	13.5	10.2	55.0	11.7	0.130	0.10	0.86	
Kargala 1514	0.1	11.7	11.1	56.1	13.4	0.095	0.12	0.94	
Sharifa	0.7	5.0	11.5	55.5	13.5	0.038	0.13	1.01	
Hordeiforme 950/99	-0.3	6.7	9.7	60.9	14.4	0.070	0.09	0.85	
Lavina	-4.2	8.3	10.7	49.1	9.5	0.073	0.11	0.92	
Damsinskaya yubileynaya	-3.2	4.7	10.8	51.0	10.4	0.040	0.12	0.94	
Shortandinskaya 256	-1.9	3.3	11.1	52.3	11.4	0.027	0.12	0.98	
Hordeiforme 18567-6	-7.7	5.7	9.8	44.1	7.0	0.059	0.09	0.86	
Hordeiforme 18585-2	0.4	0.5	10.2	60.1	14.6	0.005	0.10	0.91	
Early-ripening standard	0.6	5.8	11.3	56.4	13.7	0.046	0.13	0.98	
Mid-season standard	0.9	2.2	10.1	61.1	15.2	0.021	0.10	0.90	
Late-ripening standard	3.0	22.8	12.2	56.6	15.1	0.152	0.15	1.00	
Historical standard Bezenchukskaya 139	-1.0	7.7	12.2	49.6	11.1	0.052	0.15	1.06	
Hordeiforme 719	-3.1	6.2	12.2	44.7	9.0	0.041	0.15	1.07	
Bezenchukskaya 139	-1.0	7.7	12.2	49.6	11.1	0.052	0.15	1.06	
Hordeiforme 723	-1.0	2.5	11.8	51.5	11.6	0.018	0.14	1.04	
Hordeiforme 748	1.1	47.6	14.8	43.7	10.4	0.218	0.22	1.18	
Hordeiforme 00-178-4	1.5	11.6	13.8	48.1	11.8	0.061	0.19	1.21	
Hordeiforme 01-115-5	2.6	23.1	11.6	58.4	15.4	0.173	0.13	0.94	
Hordeiforme 03-20-18	1.8	8.4	12.0	55.7	14.1	0.059	0.14	1.03	
Elizavetinskaya	-2.9	1.0	11.6	48.2	9.9	0.008	0.13	1.03	
Valentina	1.4	12.6	12.5	52.9	13.1	0.080	0.16	1.07	
Leucurum 1307D-54	3.6	11.8	12.5	56.5	15.4	0.075	0.16	1.08	
Leucurum 1469D-21	5.7	17.1	13.8	55.4	16.1	0.090	0.19	1.18	
Leucurum 1594D-3	3.0	0.4	11.3	59.9	16.0	0.003	0.13	1.00	
χ^*		10.0	11.6	53.7	12.8	0.07	0.13	1.00	
$S_{x^{**}}$		1.99	0.25	1.33	0.50	0.01	0.01	0.02	

* Mean; ** error of the mean.

ского института земледелия (КИЗ) (Гордеiforme 18585-2), Карабалыкской СХОС (Гордеiforme 950/89), Сибирского НИИСХ (Гордеiforme 01-115-5), Актыубинской СХОС (Каргала 66) и два местных стандарта (среднеспелый и позднеспелый биотипы).

Во втором эксперименте (18 КАСИБ) первый кластер образовали пять сортов – по одному из НПЦЗХ (Гордеiforme 69-08-2), Алтайского НИИСХ (Гордеiforme 864), Карабалыкской СХОС (Л9-25-016) и два местных стандарта раннеспелого и позднеспелого биотипов. Второй

Table 3. Adaptability and stability of KASIB 18 varieties studied in Russia and Kazakhstan in 2017

Genotype	Adaptability and stability parameters							
	OAC_i	$\sigma^2(G \times E)_{gi}$	σCAC_i	S_{gi}	BVG_i	I_{gi}	K_{gi}	b_i
Kargala 223	-1.0	9.9	8.5	69.9	17.5	0.137	0.10	0.78
Kargala 228	-0.1	6.0	11.5	60.8	14.6	0.046	0.18	1.06
Kargala 238	-0.2	12.6	11.6	60.4	14.4	0.094	0.19	1.04
Line 19003	-1.6	27.3	10.2	63.4	14.8	0.265	0.14	0.83
Line 19029	-3.2	35.0	6.4	75.6	18.0	0.854	0.06	0.53
Hordeiforme 69-08-2	-3.3	12.5	12.4	52.7	10.3	0.082	0.21	1.12
Hordeiforme 178-05-2	3.4	23.8	10.9	66.8	18.9	0.200	0.17	0.92
Hordeiforme 2264	-1.8	2.4	9.6	65.0	15.2	0.026	0.13	0.90
Hordeiforme 2383	-1.5	32.3	10.8	61.2	14.1	0.275	0.16	0.88
Line 9-25-016	-5.7	9.9	10.4	56.2	10.4	0.092	0.15	0.93
Early ripening standard	-4.2	22.5	13.4	46.9	8.1	0.126	0.25	1.19
Mid-season standard	-0.6	15.1	12.0	58.1	13.4	0.104	0.20	1.07
Late-ripening standard	0.4	56.8	15.6	47.7	9.9	0.234	0.34	1.32
Historical standard Bezenchukskaya 139	-2.6	10.8	9.3	65.3	14.9	0.125	0.12	0.83
Hordeiforme 829	-0.7	5.7	12.3	57.1	13.0	0.038	0.21	1.14
Hordeiforme 864	-1.4	19.6	13.6	51.5	10.6	0.106	0.26	1.23
Hordeiforme 881	-2.9	12.0	9.4	64.5	14.5	0.135	0.12	0.84
Hordeiforme 04-76-5	0.1	5.3	12.3	58.2	13.7	0.034	0.21	1.15
Hordeiforme 05-12-7	2.7	13.3	13.1	59.1	15.3	0.077	0.24	1.20
Hordeiforme 05-42-12	3.2	24.8	11.5	64.7	17.9	0.187	0.19	0.97
Leucurum 1429-10	2.9	19.4	10.4	67.7	18.9	0.179	0.15	0.89
Leucurum 1506-36	7.1	15.8	13.7	62.3	18.9	0.084	0.26	1.26
Hordeiforme 1591-21	5.4	30.7	11.9	66.0	19.7	0.218	0.20	0.98
Annushka	2.4	80.4	13.3	58.1	14.7	0.455	0.25	0.93
Luch 25	3.0	31.3	12.1	62.8	17.0	0.215	0.20	1.02
\bar{x}^*		21.4	11.4	60.9	14.7	0.18	0.19	1.00
$S_{\bar{x}}^{**}$		3.45	0.39	2.13	0.63	0.03	0.01	0.04

* Mean; ** error of the mean.

кластер объединил 12 сортов – по два из Алтайского НИИСХ (Гордеiforme 829, Гордеiforme 881), Сибирского НИИСХ (Гордеiforme 04-76-5, Гордеiforme 05-12-7), Карабалыкской СХОС (Гордеiforme 2383, Гордеiforme 2264), Актюбинской СХОС (Каргала 238, Каргала 228), по одному из НИИСХ Юго-Востока (Аннушка) и КИЗ (Линия 19003), стандарты – один местный среднеспелого биотипа и исторический стандарт Безенчукская 139. В третий кластер вошло шесть сортов: три из Самарского НИИСХ (Леукурум 1506Д-36, Леукурум 1429Д-10, Гордеiforme 1591Д-21), по одному из Сибирского НИИСХ (Гордеiforme 05-42-12), Актюбинской СХОС (Каргала 223), НПЦЗХ (Гордеiforme 178-05-2).

Результаты дисперсионного анализа (модель неорганизованных повторений) показали значимые различия между кластерами в обоих экспериментах по урожайности, селекционной ценности ($СЦГ_i$), гомеостатичности (Hom) и коэффициенту относительной стабильности ($100 - S_{gi}$) (табл. 4 и 5).

В обоих экспериментах отсутствовали различия между кластерами по параметрам σCAC_i и b_i , характеризующим специфическую адаптивность к конкретным средам и отзывчивость на улучшение среды.

Средние величины урожайности и OAC_i сортов второго и третьего кластера в первом эксперименте (16-17 КАСИБ) различаются недостоверно. В то же время между этими кластерами отмечены значимые различия по относительной стабильности и комплексным параметрам $СЦГ_i$ и Hom , оценивающим в одной цифре стабильность и продукционные возможности сортов. Чем ниже σCAC_i и выше OAC_i (урожайность), тем выше относительная стабильность $СЦГ_i$ и Hom . Наиболее существенные различия по этим параметрам отмечены между сортами первого и третьего кластеров. Преимущество третьего кластера над первым (кроме параметров σCAC_i и b_i , по которым различия незначимы) составило от 17.4 % по урожайности до 56.1 % по Hom . Один сорт из исследуемого набора, Гордеiforme 18567-6 (КИЗ), не вошедший в кластеры,

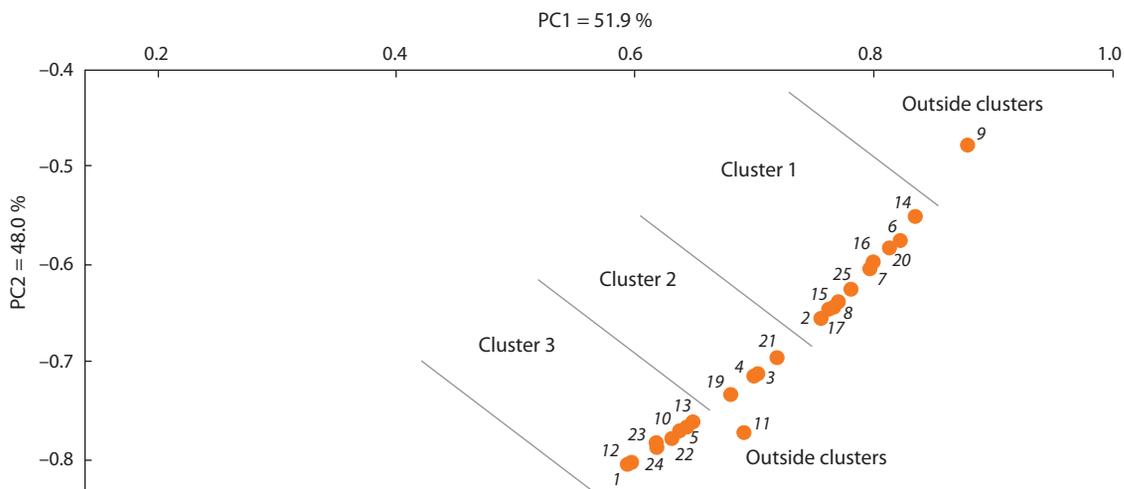


Fig. 1. Clustering of KASIB 16-17 varieties in the set of two principal components (PC1; PC2) calculated from parameters of adaptability and responsiveness: GAA_i , σSAA_i , $100-S_{gi}$, BVG_i , b_i , and Hom . Numerical designations of varieties:

1, Kargala 66; 2, Kargala 1412; 3, Kargala 1514; 4, Sharifa; 5, Hordeiforme 950/99; 6, Lavina; 7, Damsinskaya yubileynaya; 8, Shortandinskaya 256; 9, Hordeiforme 18567-6; 10, Hordeiforme 18585-2; 11–13, Local standards; 14, Hordeiforme 719; 15, Hordeiforme 723; 16, Hordeiforme 748; 17, Hordeiforme 00-178-4; 18, Hordeiforme 01-115-5; 19, Hordeiforme 03-20-18; 20, Elizavetinskaya; 21, Valentina; 22, Leucurum 1307D-54; 23, Leucurum 1469D-21; 24, Leucurum 1594D-3; 25, Bezenchukskaya 139.

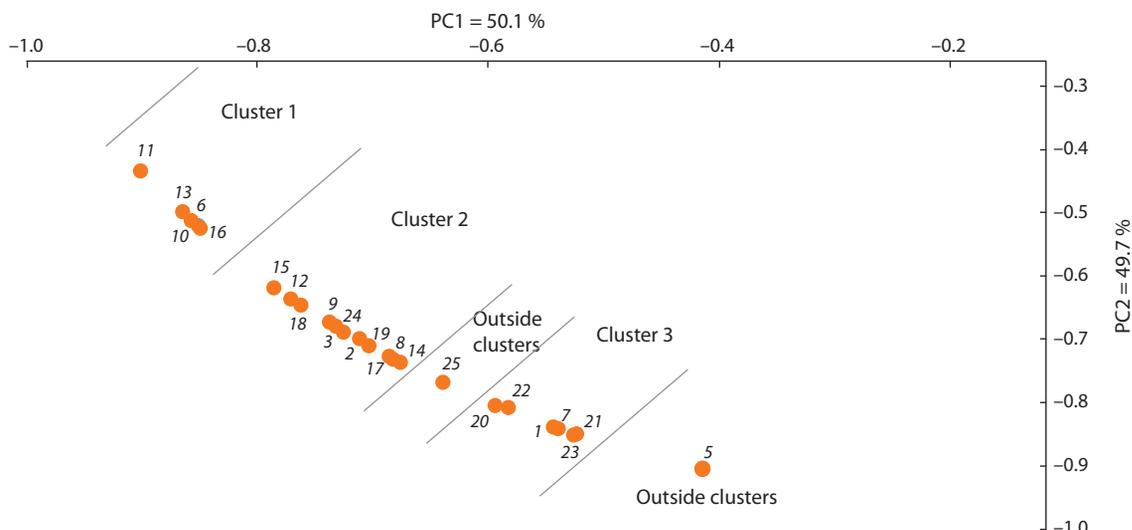


Fig. 2. Clustering of KASIB 18 varieties in the set of two principal components (PC1; PC2) calculated from parameters of adaptability and responsiveness: GAA_i , σSAA_i , S_{gi} , BVG_i , b_i , and Hom .

Numerical designations of varieties: 1, Kargala 223; 2, Kargala 228; 3, Kargala 238; 4, Line 19003; 5, Line 19029; 6, Hordeiforme 69-08-02; 7, Hordeiforme 178-05-02; 8, Hordeiforme 2264; 9, Hordeiforme 2383; 10, Line 9-25-016; 11–13, Local standards; 14, Bezenchukskaya 139; 15, Hordeiforme 829; 16, Hordeiforme 864; 17, Hordeiforme 881; 18, Hordeiforme 04-76-5; 19, Hordeiforme 05-12-7; 20, Hordeiforme 05-42-12; 21, Leucurum 1429D-10; 22, Leucurum 1506D-36; 23, Hordeiforme 1591D-21; 24, Annushka; 25, Luch 25.

характеризуется очень низкой средней урожайностью (–23.4 % к уровню первого кластера) и одновременно низкой стабильностью – параметр $100-S_{gi}$ (–13.0 %), селекционной ценностью генотипа (–34.5 %), Hom (–28.1 %) и отзывчивостью на среду b_i (–16.5 %).

Во втором эксперименте (18 КАСИБ) сорта, вошедшие в третий кластер, значимо превосходили сорта первого и второго кластеров по урожайности, стабильности ($100-S_{gi}$), селекционной ценности ($СЦГ_i$) и гомеостатич-

ности (Hom). Сорта второго кластера были обособлены от первого в основном в силу различий по стабильности ($100-S_{gi}$), $СЦГ_i$ и Hom .

В среднем по двум экспериментам (16-17, 18 КАСИБ) по доле сортов, вошедших в различные кластеры, оригинаторы отчетливо распределились на группы (рис. 3). Все изученные сорта Самарского НИИСХ вошли в третий кластер, в этот же кластер вошло 50.0 % сортов КИЗ, при этом 25.0 % сортов этого центра относились к первому

Table 4. Mean values of yield, stability, responsiveness, and breeding value for varieties in clusters, data on KASIB 16-17, 2015–2016

Cluster	Yield	σ_{CAC_i} σ_{SAAi} Specific adaptive ability	$100 - S_{gi}$ Relative stability	BVG_i Breeding value of the genotype	b_i	Hom Homeo- stasis
Cluster 1	23.5a	11.9	49.3a	10.7a	1.03	1.25a
Cluster 2	26.2b	11.8	55.0b	13.5b	1.02	1.49b
Cluster 3	27.6b	11.4	58.9c	15.3c	0.98	1.95c
F test	13.6*	NS	29.2*	85.7**	NS	35.5**
Error of the mean, %	2.51	3.3	1.97	2.54	5.59	4.5

* ** indicate 5 % and 1 % significance levels according to Fisher's test, respectively. Numerals followed by the same letters differ insignificantly according to Duncan's test

Table 5. Mean values of yield, stability, responsiveness and breeding value for varieties in clusters, data on KASIB 18, 2017

Cluster	Yield	σ_{CAC_i} σ_{SAAi} Specific adaptive ability	$100 - S_{gi}$ Relative stability	BVG_i Breeding value of the genotype	b_i	Hom Homeo- stasis
Cluster 1	26.6a	13.1	51.0a	9.9a	1.16	1.37a
Cluster 2	28.8a	11.3	60.9b	14.4b	0.99	2.15b
Cluster 3	32.9b	11.2	66.2c	18.6c	0.97	2.94c
F test	12.6*	NS	34.5*	163.9**	NS	22.5*
Error of the mean, %	2.77	3.5	1.88	2.08	5.34	6.7

* ** indicate 5 % and 1 % significance levels according to Fisher's test, respectively. Numerals followed by the same letters differ insignificantly according to Duncan's test.

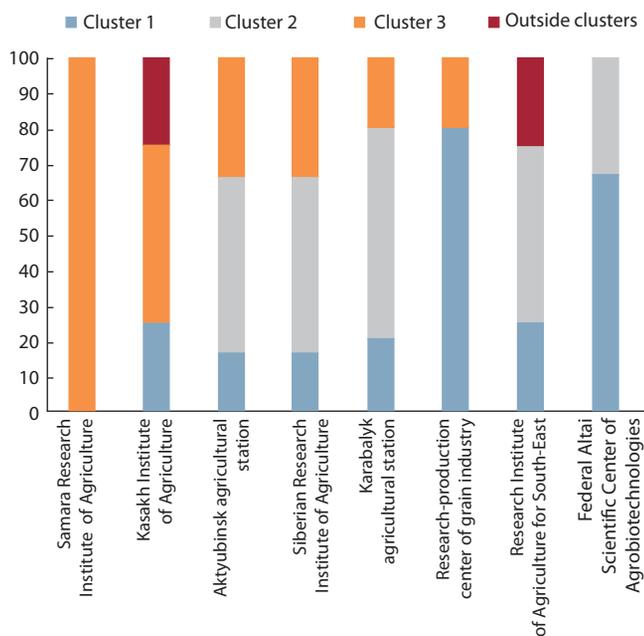


Fig. 3. Distribution of genotypes from different originators over clusters as percentages of the total number of genotypes, averaged over two experiments: KASIB 16–17 and 18.

кластеру и столько же оказалось вне кластеров. Актыубинская СХОС и Сибирский НИИСХ имели одинаковое распределение сортов по кластерам – в первый, второй и третий вошли соответственно 16.7, 50.0 и 33.3 % сортов этих учреждений. Близкое к этому соотношение наблюдалось для сортов Карабалыкской СХОС. Сорта НПЦЗХ распределялись по двум кластерам: 80.0 % вошли в первый,

20.0 % – в третий. Сорта НИИСХ Юго-Востока вошли в первый (25.0 %), во второй (50.0 %) кластеры и 25.0 % оказались вне кластеров. Все сорта Алтайского НИИСХ вошли в первый (75.0 %) и во второй (25.0 %) кластеры.

Очевидно, что в процессе селекции происходят эволюционные изменения, приводящие к формированию сортов как широкого ареала, так и локального значения, приспособленных к конкретным регионам и условиям среды. Генотипы, вошедшие в третий кластер в обоих экспериментах, можно отнести к сортам широкого ареала, соответственно, генотипы первого кластера имеют локальное значение. Сорта, вошедшие во второй кластер, по своим свойствам занимают промежуточное положение между этими двумя группами.

Отчетливо наблюдались существенные различия между средними значениями, вычисленными по каждому оригинатору (селекционному центру). Для определения эффекта оригинатора был применен однофакторный дисперсионный анализ неорганизованных повторений, где в качестве варианта рассматривались средние значения параметров по всем изученным сортам данного учреждения, а в качестве повторности привлекались значения по отдельным сортам. Сравнение полученных результатов по селекционным центрам провели с историческим стандартом – сортом Безенчукская 139 (табл. 6). В эксперименте 16-17 КАСИБ все изученные параметры по оригинаторам достоверно различались по критерию Фишера. При этом значимое превосходство над сортом Безенчукская 139 по урожайности отмечено только для Самарского НИИСХ. Сорта этого учреждения и еще трех (Актыубинская СХОС, Карабалыкская СХОС и Сибирский НИИСХ) достоверно превосходили Безенчукскую 139 по коэффициенту ста-

Table 6. Advance in yield, stability, and responsiveness to environments according to the results of ecological trials of the set of varieties over all sites, KASIB 16-17 (2015–2016), % with reference to Bezenchukskaya 139

Breeding centers	$U+V_i$	$\sigma_{CAC_i}, \sigma_{SAA_i}$	$100 - Sg_i$	BVG_i	b_i	<i>Hom</i>
Aktjubinsk agricultural station	103.8a-d	87.6ab	115.5bcd	122.9b-d	85.8ab	139.8b-d
Karabalyk agricultural station	104.8a-d	86.9ab	117.5d	126.0cd	87.5a-c	149.2d
Research & production center for grain industry	91.1a	88.8ab	102.5ab	93.9a	89.1a-d	103.6a
Kasakh Institute of Agriculture	88.9a	81.8a	105.1ab	97.3ab	83.4a	115.6abc
Bezenchukskaya 139	100.0a-c	100.0bc	100.0a	100.0a	100.0b-d	100.0a
Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies	99.8a-c	105.7c	94.0a	92.8a	103.1d	106.8ab
Siberian Research Institute of Agriculture	111.9cd	101.8bc	109.1bcd	124.0cd	99.9b-d	141.1cd
Research Institute of Agriculture for South-East	100.9a-c	98.5bc	102.0ab	103.7a-c	98.8d-d	102.3a
Samara Research Institute of Agriculture	120.8d	102.5bc	115.6dcd	142.6d	102.5cd	144.7cd
Fisher's test	3.23*	3.01*	4.37*	5.9*	2.82*	5.4*
Error of the mean, %	5.4	5.03	3.9	6.6	4.4	8.3

* 5 % significance level according to Fisher's test. Numerals followed by the same letters differ insignificantly according to Duncan's test.

Table 7. Advance in yield, stability, and responsiveness to environments according to the results of ecological trials of the set of varieties over all sites, KASIB 18 (2015–2016), % with reference to Bezenchukskaya 139

Breeding centers	$U+V_i$	$\sigma_{CAC_i}, \sigma_{SAA_i}$	$100 - Sg_i$	BVG_i	b_i	<i>Hom</i>
Aktjubinsk agricultural station	108.3abc	113.5	97.5	104.2	114.9	109.1
Karabalyk agricultural station	98.7a	110.9	93.1	89.0	108.4	81.1
Research & production center for grain industry	110.2abc	125.4	91.4	98.0	122.5	81.4
Kasakh Institute of Agriculture	100.9a	89.2	106.4	110.2	81.8	119.7
Bezenchukskaya 139	100.0a	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies	103.8ab	127.0	88.3	85.3	128.6	74.0
Siberian Research Institute of Agriculture	117.3bcd	132.8	92.9	105.0	133.1	81.6
Research Institute of Agriculture for South-East	123.0cd	136.7	92.6	106.7	116.7	84.4
Samara Research Institute of Agriculture	129.0d	129.4	100.0	128.7	125.7	109.3
Fisher's test	4.6*	NS	NS	NS	NS	NS
Error of the mean, %	4.3	8.5	5.9	8.3	9.2	17.9

* 5 % significance level according to Fisher's test. Numerals followed by the same letters differ insignificantly according to Duncan's test.

бильности ($100 - Sg_i$) и комплексным параметрам, учитывающим стабильность и продуктивность ($СЦГ_i$ и *Hom*). Параметры σ_{CAC_i} и b_i по всем оригинаторам, за исключением КИЗ, не отличались от уровня Безенчукской 139. У КИЗ они были меньше стандарта, что в сочетании с низкой средней урожайностью характеризует сорта этого центра, включенные в эксперимент как экстенсивные, слабо отзывчивые на улучшение среды. Таким образом, селекционные центры в процессе создания сортов, переданных в 16-17 КАСИБ, реализовали (если вести отсчет от Безенчукской 139) следующие направления по изменению свойств продуктивности и устойчивости: 1) значительный прогресс по средней урожайности, ее оптимальное сочетание со стабильностью, сохранение отзывчивости на уровне стандарта (Самарский НИИСХ); 2) средняя урожайность в пределах варьирования стандартного сорта

и высокая ее стабильность (Актюбинская СХОС, Карабалыкская СХОС, Сибирский НИИСХ); 3) низкая урожайность (на 11.1 % меньше стандарта), низкая вариация специфической адаптивности (изменчивость по средам) и слабая отзывчивость на среду (КИЗ); 4) урожайность и все остальные параметры не отличаются от уровня стандарта (ФГБНУ ФАНЦА, НИИСХ Юго-Востока, НПЦЗХ).

В опытах 18 КАСИБ достоверные различия между «оригинаторами» наблюдались только по урожайности зерна (табл. 7). Значимое превосходство над сортом Безенчукская 139 отмечено для трех оригинаторов: Самарского НИИСХ, НИИСХ Юго-Востока, Сибирского НИИСХ. Отсутствие различий по другим параметрам объясняется сильной изменчивостью между сортами, представляющими одно и то же селекционное учреждение. Контрастность параметров между сортами особенно заметна в материалах

Table 8. Advance in yield according to local tests in the originator institutions, KASIB 16-17 and KASIB 18, % with reference to Bezenchukskaya 139

Originator	Yield, % with respect to Bezenchukskaya 139					
	KASIB 16-17				KASIB 18	
	2015		2016		2017	
	mean	min-max	mean	min-max	mean	min-max
Aktyubinsk agricultural station	151.1	126.4–171.4	162.0	134.7–184.2	103.6	87.0–122.9
Karabalyk agricultural station	95.7	91.3–100.0	84.4	77.6–91.3	82.8	28.2–110.4
Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies	113.4	94.4–135.4	131.5	113.6–163.2	141.8	139.9–144.2
Siberian Research Institute of Agriculture	112.6	106.1–124.2	135.2	125.4–153.5	104.8	99.9–109.8
Samara Research Institute of Agriculture	132.6	121.1–141.0	132.0	123.5–136.9	114.6	103.4–136.4
Kasakh Institute of Agriculture	–	–	–	–	119.7	116.7–122.6
Research-production center of grain industry	–	–	–	–	125.2	120.1–130.4
Research Institute of Agriculture for South-East	–	–	–	–	102.7	99.7–105.7

ле следующих оригинаторов: Актыубинской СХОС (Hom , 100– Sgi), КИЗ (σCAC_i , b_i , Hom), НПЦЗХ ($СЦГ_i$, Hom , 100– Sgi), Алтайского НИИСХ (b_i), Карабалыкской СХОС ($СЦГ_i$), Самарского НИИСХ (b_i), Сибирского НИИСХ ($СЦГ_i$).

Таким образом, по средней урожайности в обоих экспериментах только сорта Самарского НИИСХ стабильно и достоверно превосходят исторический стандарт. По параметрам стабильности и отзывчивости сорта всех селекционных учреждений не имеют устойчивых изменений относительно Безенчукской 139. Можно предположить, что в процессе селекции в одном селекционном центре наряду с превалированием определенных свойств могут быть реализованы различные варианты генотипов в координатах адаптивности, стабильности и продуктивности. Очевидно, что сорта, созданные в разных учреждениях, могут иметь общие черты и однотипно реагировать на изменения среды.

Эти результаты наводят на мысль о том, что свойства адаптивности, стабильности и отзывчивости на среду в значительной степени зависят от всей совокупности условий селекционного центра, включающей биоклиматический потенциал, частоту благоприятных и стрессовых периодов в эпоункте селекции, исходный материал и реализуемые селекционные стратегии.

Систематизируя полученные данные по свойствам производимых сортов, можно вычленировать доминирующие факторы отбора, действующие в селекционных центрах. В эпоункте Самарского НИИСХ (отсутствуют сорта первого и второго кластера) с большой долей вероятности предполагается стабильное действие отбора, приводящее к созданию сортов широкого ареала. Условия функционирования селекционного процесса в Алтайском НИИСХ и НИИСХ Юго-Востока (отсутствуют сорта третьего кластера) способствуют созданию сортов локального значения, хорошо приспособленных к местным условиям среды. Все остальные селекционные центры (включают сорта первого и третьего кластеров) с определенной вероятностью могут производить сорта как широкого ареала, так и локального значения.

По результатам изучения питомников 16-17 и 18 КАСИБ, к сортам широкого ареала отнесены 13 сортов (30.9 %): Леукурум 1307д-54, Леукурум 1469д-21, Леукурум 1594д-3, Леукурум 1429-10, Леукурум 1506-36, Гордеиформе 1591-21 (Самарский НИИСХ), Гордеиформе 18585-2 (КИЗ), Гордеиформе 950/899 (Карабалыкская СХОС), Гордеиформе 01-115-5, Гордеиформе 05-42-12 (Сибирский НИИСХ), Каргала 66, Каргала 223 (Актыубинская СХОС), Гордеиформе 178-05-2 (НПЦЗХ). В группу сортов локального значения вошли также 13 сортов (30.9 %): Гордеиформе 719, Гордеиформе 748, Гордеиформе 728, Гордеиформе 864 (ФГБНУ ФАНЦА), Лавина, Дамсинская юбилейная, Шортандинская 256, Гордеиформе 69-08-2 (НПЦЗХ), Елизаветинская (НИИСХ Юго-Востока), Гордеиформе 00-178-04 (Сибирский НИИСХ), Каргала 1412 (Актыубинская СХОС), Л9-25-016 (Карабалыкская СХОС) и исторический стандарт Безенчукская 139.

Эти сорта рекомендуется использовать в селекции в качестве исходного материала по соответствующим направлениям. Сорта широкого ареала целесообразно использовать также в качестве исходного материала в селекции сортов локального значения для усиления стабильности их продукционных свойств.

Наряду с этим прогресс увеличения урожайности относительно Безенчукской 139 в каждом селекционном центре имел более устойчивые тенденции (табл. 8). Сорта местной селекции Актыубинской СХОС, Алтайского НИИСХ, Сибирского НИИСХ и Самарского НИИСХ при изучении в эксперименте 16-17 КАСИБ (2015–2016 гг.) значительно (на 112.6–162.0 %) превысили в этих селекционных центрах уровень Безенчукской 139 и только на Карабалыкской СХОС получен отрицательный результат. Аналогичное исследование в 18 КАСИБ показало положительный тренд по урожайности (114.6–141.8 %) для четырех селекционных центров – Алтайского НИИСХ, Самарского НИИСХ, КИЗ и НПЦЗХ. При этом среди сортов всех селекционных центров обнаружены генотипы, более продуктивные (109.8–144.2 %), чем Безенчукская 139. Если ориентироваться только на лучшие генотипы, то

наиболее значимый и устойчивый прогресс в обоих экспериментах отмечен для Алтайского НИИСХ (135.4 и 163.2 % к Безенчукской 139), что можно объяснить высокой эффективностью селекции по созданию сортов локального значения в этом селекционном центре.

Значительные различия между сортами одного и того же учреждения по урожайности, другим изученным параметрам в обоих экспериментах, тренду урожайности относительно Безенчукской 139 в каждом селекционном центре можно объяснить тем, что исследованный в наших экспериментах селекционно-генетический материал не прошел весь цикл селекционного процесса (за исключением сортов НИИСХ Юго-Востока), завершением которого справедливо считается допуск сорта к коммерческому использованию. Это связано с подходами к формированию питомников программы КАСИБ, функциональным предназначением которой является расширение возможностей селекционного процесса на завершающем этапе селекции. Полученные результаты подтверждают целесообразность и необходимость широкого экологического испытания сортов на этом этапе селекции, что соответствует методологии, разработанной Международным центром улучшения кукурузы и пшеницы (СИММУТ). Эффективность международных многоуровневых испытаний пшеницы, проводившихся в течение XX века СИММУТ с использованием соответствующих генетических вариаций, оказалась очень высокой. Результат этого подхода известен в форме Зеленой революции (Trethowan et al., 2007). В настоящее время методология нуждается в тонкой настройке в связи с изменением климата и особенностями условий крупных регионов. Стратегия улучшения пшеницы включает введение новых источников генетической изменчивости через дикие виды, использование синтетических форм на основе *Aegilops tauschii*, *Triticum dicoccum*, местных сортов (landraces) и, возможно, трансгеноза для трудно передаваемых при половой гибридизации признаков. Этот вариант сочетается с функционированием международных питомников испытаний и системой челночной селекции. Эффективность селекции повышается за счет применения молекулярных маркеров, более целенаправленного использования физиологических признаков формирования урожая, генетики растений, биостатистики и биоинформатики. Важная роль в этом процессе отводится поиску QTL адаптаций и их маркированию. Первый этап этих исследований предусматривает мультилокальные испытания экспериментальных популяций (Lage, Trethowan, 2008; Crossa et al., 2014).

Результаты, представленные в настоящей статье, можно рассматривать как первоначальный этап поиска перспективных для селекции генотипов и характеристики их адаптивных свойств, связанных с формированием урожайности и получения информации, необходимой для развития современных методов селекции.

Таким образом, в процессе эколого-географического изучения современного селекционного материала твердой пшеницы из России и Казахстана выявлены значимые эффекты генотипа и генотип-средовых взаимодействий, суммарно составившие 15.8–23.5 % от общей дисперсии урожайности. Генотип-средовые взаимодействия носили линейный характер, эффекты дестабилизации были незна-

чительными, что предполагает схожую по направлению реакцию сортов на изменение условий среды. Все изученные в обоих экспериментах генотипы в результате применения методов кластерного анализа и главных компонент к массиву данных по OAC_i , σCAS_i , $100 - Sgi$, $CIГ_i$, b_i , Hom распределялись на три кластера. Дифференциация сортов по OAC_i (средней урожайности), $100 - Sgi$, $CIГ_i$, Hom стала определяющим фактором формирования кластеров. Первый кластер объединил генотипы, имеющие локальное значение, хорошо приспособленные к конкретным условиям среды. Третий кластер образовали сорта широкого ареала, с высокой средней урожайностью, стабильностью, гомеостатичностью и селекционной ценностью. Второй кластер включал генотипы с промежуточными величинами большинства параметров. В экопункте Самарского НИИСХ предполагается стабильное действие факторов, приводящих к созданию сортов широкого ареала. Условия функционирования селекционного процесса в Алтайском НИИСХ и НИИСХ Юго-Востока способствуют созданию сортов локального значения, хорошо приспособленных к местным факторам среды. Выделенные генотипы широкого ареала и локального значения рекомендуется использовать в селекции в качестве исходного материала по соответствующим направлениям. По средней урожайности стабильное превосходство над историческим стандартом показали только сорта Самарского НИИСХ. По параметрам стабильности и отзывчивости сорта всех селекционных учреждений не имеют устойчивых изменений относительно Безенчукской 139, что объясняется незавершенностью селекционного процесса по этим свойствам и подтверждает целесообразность функционирования программы КАСИБ. В то же время увеличение урожайности относительно Безенчукской 139 в каждом селекционном центре было более большим и стабильным в обоих экспериментах. Наиболее значимый и устойчивый тренд в обоих экспериментах отмечен для сортов Алтайского НИИСХ (135.4 и 163.2 % к Безенчукской 139), что можно объяснить высокой эффективностью селекции по созданию сортов локального значения в этом селекционном центре.

Acknowledgements

The authors are grateful to the staff of the KASIB enterprise for collaboration and discussion of the experimental results in workshops and conferences.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы / References

- Батыгин Н.Ф. Физиология онтогенеза. Теоретические основы селекции. Т. 2. Ч. 1. Физиологические основы селекции растений. СПб.; 1995; 14-97.
[Batyguin N.F. Physiology of Ontogeny. Theoretical Basis of Breeding. V. 2. Pt. 1. Physiological Basis of Plant Breeding. St. Petersburg; 1995; 14-97. (in Russian)]
Васильчук Н.С. Селекция яровой твердой пшеницы. Саратов, 2001. [Vasil'chuk N.S. Spring Durum Wheat Breeding. Saratov, 2001. (in Russian)]
Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Экологическая селекция растений. Минск: Техналогія, 1997.

- [Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. Ecological Plant Breeding. Minsk: Technologia Publ., 1997. (in Russian)]
- Кумаков В.А. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. М., 1985.
[Kumakov V.A. Physiological Grounds of Models of Wheat Varieties. Moscow, 1985. (in Russian)]
- Хангильдин В.В. О принципах моделирования сортов интенсивного типа. Генетика количественных признаков сельскохозяйственных растений. М., 1978;111-116.
[Khungildin V.V. Principles of Modeling Intensive Varieties. Genetics of Quantitative Traits of Crop Plants. Moscow, 1978;111-116. (in Russian)]
- Braun H.-J., Rajaram S., van Ginkel M. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92. 1996;175-183.
- Calderini D.F., Slafer G.A. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Res.* 1998;57:335-347. DOI 10.1016/S0378-4290(98)00080-x.
- Ceccarelli S. Positive interpretation of genotype by environment interactions in relation to sustainability and biodiversity. Eds. M. Cooper, G.L. Hammer. *Plant Adaptation and Crop Improvement*. Wallingford, 1996;467-486.
- Crossa J., Pérez P., Hickey J., Burgueño J., Ornela L., Cerón-Rojas J., Zhang X., Dreisigacker S., Babu R., Li Y., Bonnett D., Mathews K. Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding programs. *Heredity*. 2014;(112):48-60.
- De Vita P., Mastrangelo A.M., Matteu L., Mazzucotelli E., Virzi N., Palumboc M., Lo Storto M., Rizza F., Cattivelli L. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Res.* 2010;119:68-77. DOI 10.1016/j.fcr.2010.06.016.
- Duvick D.N., Smith J.S.C., Cooper M. Changes in performance, parentage, and genetic diversity of successful corn hybrids, 1930 to 2000. Eds. C.W. Smith, J. Betran, E.C.A. Runge. *Corn: Origin, History, Technology and Production*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2004;65-97.
- Eberhart S.A., Russell W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 1966;6:36-40. DOI 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.
- Evans L.T. *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
- Fufa H., Baenziger P.S., Beecher B.S., Graybosch R.A., Eskridge K.M. Genetic improvement trends in agronomic performances and end-use quality characteristics among hard red winter wheat cultivars in Nebraska. *Euphytica*. 2005;144:187-198. DOI 10.1007/s10681-005-5811-x.
- Lage J., Trethowan R.M. CIMMYT's use of synthetic hexaploid wheat in breeding for adaptation to rainfed environments globally. *Aust. J. Agric. Res.* 2008;59(5):461-469. DOI 10.1071/AR07223.
- Lin C.S., Binns M.R. A method for analyzing cultivar \times location \times year experiments: a new stability parameter. *Theor. Appl. Genet.* 1988; 76:425-430. DOI 10.1007/BF00265344.
- Lin C.S., Binns M.R. Genetic properties of four types of stability parameter. *Theor. Appl. Genet.* 1991;82:505-509. DOI 10.1007/BF00588606.
- Rajaram S. Is Conventional plant breeding still relevant? Increasing Wheat Production in Central Asia through Science and International Cooperation. *Proc. First Central Asia Wheat Conf. Almaty. Kazakhstan*, 2003;1-4.
- Romagosa I., Fox P.N. Genotype \times environment interaction and adaptation. Eds. M.D. Hayward, N.O. Bosemark, I. Romagosa. *Plant Breeding: Principles and Prospects*. London: Chapman & Hall, 1993;373-390.
- Tollenaar M., Lee E.A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 2002;75:161-169. DOI 10.1016/S0378-4290(02)00024-2.
- Trethowan R., Ortiz Ferrara G., Iwanaga M., Dodds J.H., Crouch J.H., Crossa J., Hans-Braun J. High yield potential, shuttle breeding, genetic diversity, and a new international wheat improvement strategy. *Euphytica*. 2007;157(3):365-384.

ORCID ID

P.N. Mal'chikov orcid.org/0000-0002-2141-6836

M.A. Rozova orcid.org/0000-0002-0119-5693

A.I. Morgunov orcid.org/0000-0001-7082-5655

M.G. Myasnikova orcid.org/0000-0002-7224-0308

Yu.I. Zelensky orcid.org/0000-0001-8512-0738