

УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНА СЕЛЕКЦИОННЫХ ЛИНИЙ ЯРОВОЙ ТВЕРДОЙ ПШЕНИЦЫ, СОЗДАНЫХ В СЕЛЕКЦИОННЫХ ЦЕНТРАХ РОССИИ В УСЛОВИЯХ САМАРСКОГО НИИСХ

П.Н. МАЛЬЧИКОВ^{1,2}, доктор сельскохозяйственных наук, E-mail: sagrs-mal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2141-6836

М.Г. МЯСНИКОВА¹, кандидат сельскохозяйственных наук, E-mail: marina.myasnikova.61@mail.ru, ORCID ID:0000-0002-7224-0308

¹САМАРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РАН, САМАРСКИЙ НАУЧНО_ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ИМ. Н.М.ТУЛАЙКОВА

²ФИЦ ИНСТИТУТ ЦИТОЛОГИИ И ГЕНЕТИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

Аннотация. Исследование выполнено на основе методологии GGE биplot анализа. Визуальный анализ графиков позволил идентифицировать, следующие группы генотипов: 1) отзывчивые на благоприятные условия среды - 3761h-46, 804d-94 Национального центра зерна им.П.П.Лукьяненко (НЦ зерна им. П.П.Лукьяненко), Гордеиформе 1099, Гордеиформе 1091 (ФГБНУ ФАНЦА), Леукурум 3417 Краснокутской селекционной станции (Краснокутская СС), 2) генотипы с высокой урожайностью (значительно превышающих среднюю по опыту) и её стабильностью - Леукурум 3437, Леукурум 3462 (Краснокутская СС) и 847d14 (НЦ зерна им. П.П.Лукьяненко), 3) генотипы соответствующие по урожайности и стабильности идеальному генотипу – Безенчукская 210 (стандарт, Самарский НИИСХ), Гордеиформе 1082 (ФГБНУ ФАНЦА) и генотипы по своим свойствам близкие к идеальному - 837d-25 (НЦ зерна им.П.П.Лукьяненко), Леукурум3438 (Краснокутская СС), №28 (ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока), Гордеиформе 888, Гордеиформе 960 (ФГБНУ ФАНЦА), 4) максимальная дифференцирующая способность среды установлена для условий 2024 года с самой низкой урожайностью и максимальной нагрузкой лимитирующих факторов и высокой эффективностью отбора устойчивых генотипов. Идентифицированные генотипы (приведены выше) целесообразно использовать в селекции твердой пшеницы в Самарском НИИСХ в качестве базовых для расширения генетического разнообразия создаваемых сортов.

Ключевые слова: пшеница твердая, сорт, урожайность, стабильность, GGE биplot анализ.

Для цитирования: Мальчиков П.Н., Мясникова М.Г. Урожайность зерна селекционных линий яровой твердой пшеницы, созданных в селекционных центрах России в условиях Самарского НИИСХ. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024; 4(52):128-138. DOI: 10.24412/2309- 348X-2024-4-128-138

GRAIN YIELD OF AGRICULTURAL BREEDING OF SPRING DURUM WHEAT LINES CREATED IN THE BREEDING CENTERS OF RUSSIA, IN THE CONDITIONS OF THE SAMARA RESEARCH INSTITUTE

P.N. Malchikov^{1,2}, M.G. Myasnikova¹

¹FSBSI N.M. TULAYKOV SAMARA RESEARCH INSTITUTE OF AGRICULTURE– BRANCH SamFRC RAS

²FEDERAL RESEARCH CENTER «INSTITUTE OF CYTOLOGY AND GENETICS OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE RAS», Novosibirsk, Russia

Abstract: *The study was carried out based on the GGE biplot analysis methodology. Visual analysis of the graphs allowed us to identify the following groups of genotypes: 1) responsive to favorable environmental conditions - 3761h-46, 804d-94 of the P.P. Lukyanenko National Grain Center (P.P. Lukyanenko Grain Center), Hordeiforme 1099, Hordeiforme 1091 (FGBNU FANTSA), Leucurum 3417 of the Krasnokutsk Breeding Station (Krasnokutskaya SS), 2) genotypes with high yield (significantly exceeding the average for the experiment) and its stability - Leucurum 3437, Leucurum 3462 (Krasnokutskaya SS) and 847d14 (P.P. Lukyanenko Grain Center), 3) genotypes corresponding to the ideal in yield and stability - Bezenchukskaya 210 (standard, Samara Research Institute of Agriculture), Hordeiform 1082 (Federal State Budgetary Scientific Institution FANTSA) and genotypes close to ideal in their properties - 837d-25 (P.P. Lukyanenko Scientific Center of Grain), Leucurum 3438 (Krasnokutskaya SS), No. 28 (Federal State Budgetary Scientific Institution Research Institute of Agriculture of the South-East), Hordeiform 888, Hordeiform 960 (Federal State Budgetary Scientific Institution FANTSA), 4) the maximum differentiating capacity of the environment is established for the conditions of 2024 with the lowest yield and maximum load of limiting factors and high efficiency of selection of resistant genotypes. It is advisable to use the identified genotypes (given above) in the breeding of durum wheat in the Samara Research Institute of Agriculture as basic genotypes to expand the genetic diversity of the varieties being created.*

Keywords: durum wheat, variety, yield, stability, GGE biplot analysis.

Введение

Создание высокопродуктивных сортов связано с совершенствованием двух сложных генетических систем – потенциальной продуктивности и способности стабилизировать процессы формирования урожайности при варьировании условий среды. Эти задачи реализуются при создании сортов устойчивых к стрессам биотической (патогены, вредители) и абиотической (засуха, температурные аномалии, засоленность и кислотность почвы) природы с высокой эффективностью использования питательных веществ, солнечной радиации и ресурсов влаги [1, 2]. Отбор соответствующего этим требованиям селекционного материала может быть эффективным при его проведении на адекватных средовых фонах. Селекция в этом случае ведется с учетом взаимодействий генотип-среда (genotype-environment interaction – GEI), проявляющихся при изучении исследуемого набора генотипов в разных средах [3]. Методологический подход с целью оценки GEI связан с организацией эксперимента либо во времени (изучения в одном экопункте – по годам, или технологическим фонам), либо в пространстве (разные экопункты), либо эти два подхода объединяются в один эксперимент [3].

Стратегическая задача состоит в том, чтобы в процессе эксперимента идентифицировать генотипы с минимальными значениями GEI в мега-среде или в конкретной среде с возможностью прогнозирования продукционных возможностей отобранных генотипов.

Для интерпретации полученных в подобных экспериментах результатов используют методы регрессионного, многомерного анализа и непараметрической статистики [4].

Кроме этих методов статистического анализа, широко применяется метод главных компонент PCA (principle component analysis) с визуализацией результатов варьирования генотипов и сред на двухмерном графике при доминирующем влиянии в общей дисперсии двух главных компонент в моделях GGE биplot (G – генотип, GE – генотип – средовые взаимодействия) анализа [5]. Эти модели эффективны как на завершающих этапах селекции (конкурсное, экологическое сортоиспытание), так и при изучении исходного материала [6,7]. В частности, этот метод целесообразно применять при отборе адаптированных генотипов из коллекции сортов инорайонной селекции для расширения генетического разнообразия среди базовых сортов местной селекции.

Для определения эффектов генотипа, среды и структуры их взаимодействия применяли графический метод GGE biplot анализа. Данные по урожайности сортов статистически обработаны и представлены графически (GGE biplot) при помощи программы Genstat 12.

Цель исследований – идентификация адаптированных к условиям Среднего Поволжья генотипов (селекционных линий), созданных в Национальном центре зерна им.П.П.

Материал и методы исследований

Объектами исследований были: 5 селекционных линий Краснокутской СС – Гордеиформе 3419, 3417, 3437, 3438, 3462; 6 линий, созданных в НЦ зерна им.П.П. Лукьяненко – 3716h-46, 656d-11, 662d-58, 804d-94, 837d-125, 841d-14; 13 линий алтайской селекции ФГБНУ ФАНЦА – Гордеиформе 1068, Гордеиформе 1079, Гордеиформе 1080, Гордеиформе 1082, Гордеиформе Гордеиформе 1088, Гордеиформе 1096, Гордеиформе 1091, Гордеиформе 1094, Гордеиформе 1099, Гордеиформе 829, Гордеиформе 888, Гордеиформе 960, Леукурум 1005; 5 линий селекции ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока – № 8, № 9, № 15, № 24, № 25. В эксперимент был включен стандартный сорт Самарского НИИСХ – Безенчукская 210, допущенный к хозяйственному использованию в 7 и 9 регионах России, который относится к среднеспелому биотипу, среднерослый, адаптирован к климатическим факторам Среднего Поволжья и Урала.

Эксперимент проводился в течение 3-х лет на опытном поле Самарского НИИСХ. Почва экспериментального участка-тяжелосуглинистый чернозем с содержанием гумуса 4,0...4,5%, азота – 5,5...7,0 мг/кг (по Тюрину), подвижного фосфора – 315...361 мг/кг (по Чирикову), обменного калия – 210...267 мг/кг (по Мачигину), рН в водной вытяжке – 6,95. Посев проводили по черному пару, после боронования и предпосевной культивации, сеялкой «Клён-1,5» на делянках с учетной площадью 10,0 м², в 3-х кратной повторности с рендомизированным размещением вариантов в блоках. Уборка делянок проводилась в период полного созревания зерна с применением агрегатов Sampo 130 и Wintersteiger. Урожайность зерна приведена к стандартной влажности – 14,0%.

Условия среды 2022 и 2023 гг. были благоприятными для формирования высоких урожаев твердой пшеницы. В 2022 г. – ГТК за вегетацию достиг 0,84 при благоприятных условиях при прохождении всех фаз развития твердой пшеницы. Урожайность стандарта – Безенчукской 210 достигла – 44,1 ц/га. В 2023 г., несмотря на низкий ГТК за вегетацию (0,55), урожайность стандарта – Безенчукской 210 в опыте составила 26,1 ц/га. Полученный результат связан с благоприятными гидротермическими условиями в период трубкование-колошение (ГТК – 1,34) и достаточным количеством осадков при формировании и наливе зерна 35,5 мм. Метеорологические условия 2024 г. были неблагоприятными для процессов формирования урожайности твердой пшеницы. Продолжительный период от посева до всходов (14 дней) сопровождался развитием корневых гнилей (*Fusarium sp.*) с последующим изреживанием посевов. Отсутствие осадков в период всходы-трубкование усилило этот негативный эффект на формирование стеблестоя. Недостаточное количество осадков и высокие температуры в период формирования и налива зерна отрицательно повлияли на величину урожайности зерна всех сортов. Урожайность стандарта составила 12,1 ц/га. Урожайность зерна исследуемого набора генотипов варьировала в пределах от 1,4 ц/га до 12,3 ц/га.

В целом условия среды за 3-х летний период изучения селекционного материала, полученного из разных селекционных центров России, позволили оценить потенциал продуктивности и устойчивости селекционных линий и выделить адаптированные генотипы для использования в селекционном процессе в условиях Среднего Поволжья (табл. 1).

Метеорологические условия по периодам вегетации пшеницы твердой (по сорту стандарту Безенчукская 139) в годы исследований

| Метеопараметр | Всходы-кущение | Кущение – трубкавание | Трубкавание – колошение | Колошение – восковая спелость | Восковая спелость – уборка урожая | За вегетацию в целом |
|----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 2022 г. | | | | | | |
| Осадки, мм | 42,1 | 45,5 | 18,1 | 48,8 | 18,3 | 142,8 |
| Сумма температур, °С | 447,9 | 395,7 | 192,6 | 420,7 | 234,6 | 1700,0 |
| ГТК | 0,94 | 1,15 | 0,94 | 1,16 | 0,78 | 0,89 |
| 2023 г. | | | | | | |
| Осадки, мм | 8,9 | 19,1 | 25,8 | 22,7 | 12,8 | 89,3 |
| Сумма температур, °С | 387,0 | 353,7 | 192,5 | 428,3 | 237,0 | 1623,6 |
| ГТК | 0,23 | 0,54 | 1,34 | 0,53 | 0,54 | 0,55 |
| 2024 г. | | | | | | |
| Осадки, мм | 0,00 | 4,4 | 23,3 | 27,7 | 45,7 | 101,1 |
| Сумма температур, °С | 281,4 | 223 | 255 | 659 | 460 | 1878,4 |
| ГТК | 0,00 | 0,20 | 0,91 | 0,42 | 0,99 | 0,54 |

Результаты и обсуждение

Средняя урожайность по годам с учетом показателей всех сортов составила в 2024 г. – 6,8 ц/га, в 2023г. - 21,6 ц/га (+317,6% к 2024г.), в 2022 г. – 42,1 ц/га (+619,1% к 2024г. и +194,9% к 2023г.). Урожайность сортов по данным за 3 года изменялась от 18,0 ц/га у Гордеиформе 1094, до 27,4 ц/га у Безенчукской 210 (+152,2% к уровню Гордеиформе 1094). Эти результаты предполагают значимые эффекты условий года, генотипа и их взаимодействия (табл. 2).

Таблица 2

Урожайность селекционных линий яровой твёрдой пшеницы в Самарском НИИСХ

| № п/п | Сорт | Оигинатор | 2022 | 2023 | 2024 | Средняя |
|-------|-----------|----------------------------|------|------|------|---------|
| | | | | | | |
| 1 | Горд.3419 | Краснокутская СС | 41,3 | 20,4 | 6,8 | 22,8 |
| 2 | Леук.3417 | Краснокутская СС | 42,9 | 19,9 | 7,6 | 23,4 |
| 3 | Леук.3437 | Краснокутская СС | 43,5 | 19,8 | 9,7 | 24,3 |
| 4 | Леук.3438 | Краснокутская СС | 45,2 | 21,0 | 9,8 | 25,3 |
| 5 | Леук.3462 | Краснокутская СС | 43,5 | 22,6 | 8,3 | 24,8 |
| 6 | 3761h-46 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 48,6 | 14,1 | 6,2 | 23,0 |
| 7 | 656d-11 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 46,3 | 12,0 | 4,6 | 21,0 |
| 8 | 662d-58 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 43,8 | 11,4 | 3,0 | 19,4 |
| 9 | 804d-94 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 48,1 | 16,1 | 6,7 | 23,7 |
| 10 | 837d-125 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 46,3 | 20,5 | 10,7 | 25,8 |
| 11 | 841d-14 | НЦ зерна им.П.П.Лукияненко | 44,1 | 21,1 | 8,9 | 24,7 |
| 12 | Горд.1068 | ФГБНУ ФАНЦА | 36,2 | 25,2 | 1,2 | 20,8 |
| 13 | Горд.1079 | ФГБНУ ФАНЦА | 36,7 | 22,2 | 9,9 | 22,9 |
| 14 | Горд.1080 | ФГБНУ ФАНЦА | 38,0 | 25,6 | 8,5 | 24,0 |
| 15 | Горд.1082 | ФГБНУ ФАНЦА | 41,5 | 23,8 | 12,3 | 25,9 |

| Продолжение табл.2 | | | | | | |
|--------------------|--------------|-------------------------|------|------|------|------|
| 16 | Горд.1088 | ФГБНУ ФАНЦА | 38,4 | 22,5 | 3,7 | 21,5 |
| 17 | Горд.1096 | ФГБНУ ФАНЦА | 42,8 | 22,6 | 1,4 | 22,2 |
| 18 | Горд.1091 | ФГБНУ ФАНЦА | 45,2 | 23,6 | 5,4 | 24,7 |
| 19 | Горд.1094 | ФГБНУ ФАНЦА | 29,5 | 22,3 | 2,2 | 18,0 |
| 20 | Горд.1099 | ФГБНУ ФАНЦА | 44,7 | 18,4 | 7,8 | 23,6 |
| 21 | Горд.829 | ФГБНУ ФАНЦА | 42,7 | 24,0 | 1,2 | 22,6 |
| 22 | Безенчук.210 | Самарский НИИСХ | 44,1 | 26,1 | 12,1 | 27,4 |
| 23 | Гор.888 | ФГБНУ ФАНЦА | 39,6 | 25,6 | 11,3 | 25,5 |
| 24 | Гор.960 | ФГБНУ ФАНЦА | 38,4 | 25,3 | 12,3 | 25,3 |
| 25 | Л1005 | ФГБНУ ФАНЦА | 38,8 | 26,0 | 4,0 | 22,9 |
| 26 | 8 | ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока | 42,2 | 22,9 | 6,7 | 23,9 |
| 27 | 9 | ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока | 44,3 | 23,8 | 6,1 | 24,7 |
| 28 | 15 | ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока | 41,7 | 22,1 | 3,1 | 22,3 |
| 29 | 27 | ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока | 42,5 | 22,4 | 3,7 | 22,9 |
| 30 | 28 | ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока | 42,0 | 23,8 | 9,6 | 25,1 |
| В среднем по годам | | | 42,1 | 21,6 | 6,8 | 23,5 |

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа подтвердили это предположение. Обнаружены значимые эффекты генотипов, среды (годы) и их взаимодействия. Вклад условий среды (годы) в общую дисперсию был определяющим – 90,9%, доля генотипов и генотип-средовых взаимодействий составила 3,4% и 4,3% соответственно. Достоверность всех компонентов дисперсии позволяет использовать методологию GGE биplot-анализа (табл. 3).

Таблица 3

Вклад в общую дисперсию изменчивости генотипов, среды (годы), их взаимодействия, значимость их эффектов и достоверность различий между вариантами

| Источник дисперсии | SS | Доля факторов в общей дисперсии | F | НСР 0,05 |
|---------------------------------|---------|---------------------------------|-------|----------|
| Общее | 60824,9 | 100,0 | | |
| Генотипы | 2043,6 | 3,4 | 7,8* | 2,0 |
| Среда (годы) | 55297,7 | 90,9 | 6100* | 0,63 |
| Генотип-средовые взаимодействия | 2628,7 | 4,3 | 9,8* | 3,46 |
| остаточное | 854,9 | 1,4 | | |

Биplot анализ по методу GGE biplot позволил визуально на графиках адекватно представить эффекты генотипов, среды и генотип-средовых взаимодействий. Правомерность применения метода основана на определяющем вкладе в общую дисперсию первых 2-х главных компонент (PC-1 и PC-2) факторного анализа, составившего в сумме 97,15%.

Первый график представляет взаимодействие между генотипами и генотипов со средой в виде многоугольника «which-won-where – какой генотип где выиграл» (рис. 1).

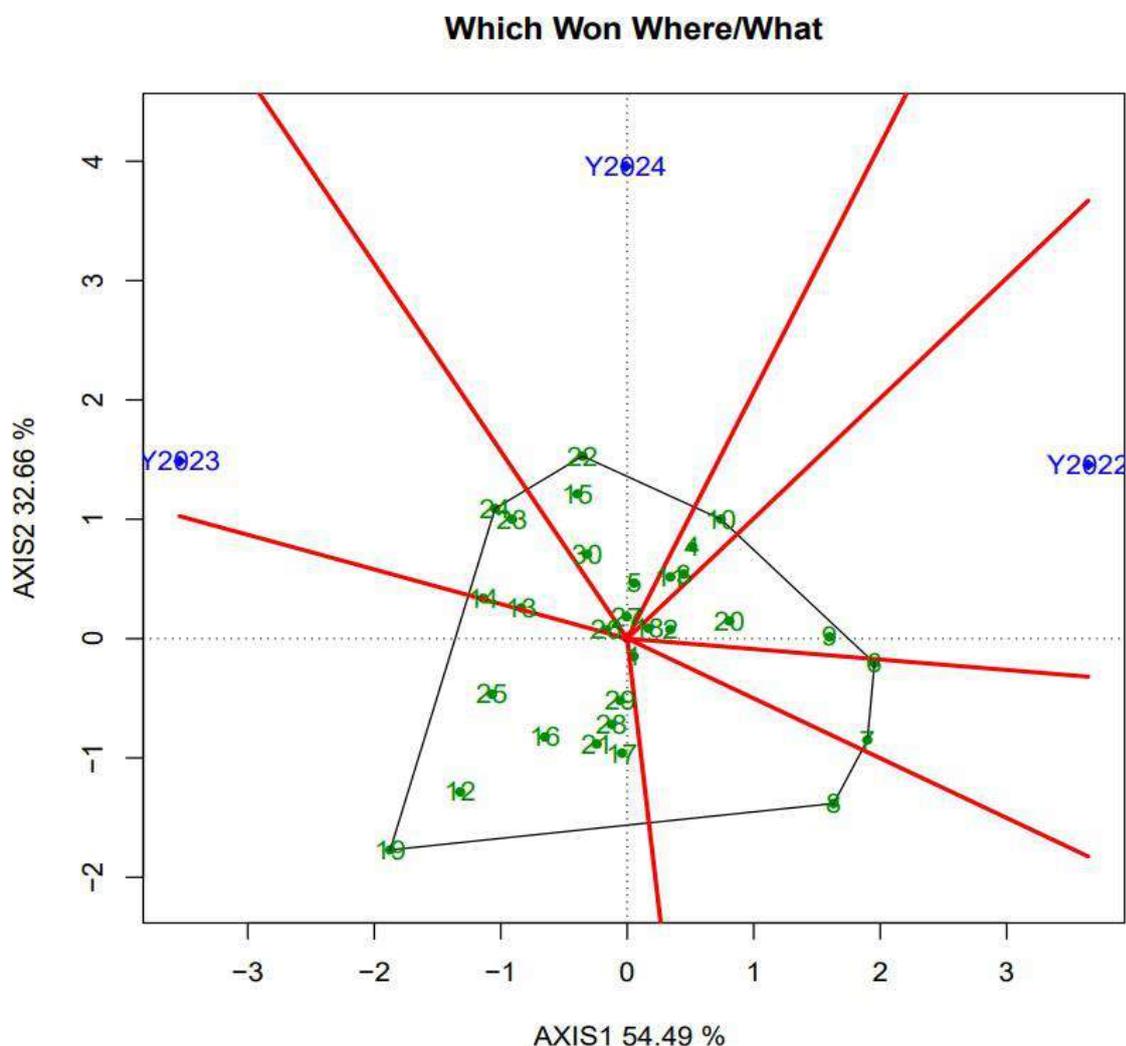


Рис. 1. GGE biplot в виде многоугольника, характеризующий генотип-средовые взаимодействия по схеме «какой генотип где выиграл». Ось AXIS1 показывает вклад в дисперсию PC1, ось AXIS2 – PC2. Цифрами 1-30 обозначены номера генотипов в соответствии с таблицей № 1. Символами Y обозначены среды, образованные условиями соответствующего года исследований

Углы многоугольника образуют наиболее удаленные от начала координат точки биplotа, отражающие расположение генотипов на графике, - № 22 (Безенчукская 210), № 10 (837d-125). № 6 (3761h-46), № 24 (Гордеиформе 960), № 7 (656d-11), № 8 (662d-58), № 19 (Гордеиформе 1094), остальные точки расположены внутри многоугольника. Линии, проведенные через начало координат разделяют биplot на сектора. Условия среды в годы исследований сильно различались, что отображено на графике – точки Y2022, Y2023, Y2024 расположены в разных секторах. В секторе с максимальной продуктивностью среды (Y2022=42,1ц/га) расположены следующие генотипы – по два селекции НЦ зерна им. П.П.Лукьяненко и ФГБНУ ФАНЦА – № 6 (3761h-46), № 9 (804d-94), № 20 (Гордеиформе 1099), № 18 (Гордеиформе 1091) соответственно и один Краснокутской селекции – № 2 (Леукурум 3417). Взаимодействие этих генотипов в системе GGE biplot позволяет отнести их к группе наиболее отзывчивых на благоприятные условия среды. В одном секторе, включающем среднюю продуктивность условий среды в эксперименте (Y2023=21,6ц/га) располагались 4 линии, созданные в ФГБНУ ФАНЦА № 24, 23,14,13 (Гордеиформе 960, Гордеиформе 888, Гордеиформе 1080, Гордеиформе 1079 соответственно) и одна в ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока № 26 (№ 8). Эти генотипы в совокупности изученных сред и генотипов лучше других генетических вариантов используют ресурсы среды со средней продуктивностью, варьирующей около величины 21,6

ц/га. Сектор с низкой продуктивностью среды 2024 года ($Y_{2024} = 6,8$ ц/га) включал стандартный сорт Самарского НИИСХ №22 (Безенчукская 210), две линии ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока – № 27 (9), № 30 (28), по одной линии из ФГБНУ ФАНЦА – № 15 (Гордеиформе 1082) и Краснокутской СС № 5 (Леукурум 3462). Эти генотипы из всей совокупности условий среды, лучше других изученных генотипов, приспособлены к лимитирующим факторам 2024 года – перепадам температур в начале вегетации, корневым гнилям, листовым пятнистостям и высокой температуре в период формирования и налива зерна. Линии № 10 (837d-125), № 11 (841d-125) из НЦ зерна им. П.П. Лукьяненко, № 3 (Леукурум 3437), № 4 (Леукурум 3438) селекции Краснокутской СС, вошедшие в узкий сектор между секторами Y_{2024} и Y_{2022} , можно отнести к группе с достаточной отзывчивостью на благоприятные условия среды и устойчивостью к стрессовым факторам 2024 года. Одиннадцать селекционных линий не вошли в средовые сектора, три из них селекции НЦ зерна им. П.П. Лукьяненко – № 7 (856d-11), № 8 (662d-58), одна № 1 (Гордеиформе 3419) Краснокутской СС, две ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока – № 28 (15), № 29 (27) и шесть ФГБНУ ФАНЦА – № 16 (Гордеиформе 1088), (№ 17 (Гордеиформе 1096), № 21 (Гордеиформе 829), № 25 (Леукурум 1005), № 12 (Гордеиформе 1068), № 19 (Гордеиформе 1094). Эти генотипы не обладают свойствами адаптации к спектру условий среды, имевшему место в эксперименте.

Следующий GGE биplot характеризует генотип-средовые взаимодействия по урожайности и её стабильности на основе её средних средовых значений (рис. 2).

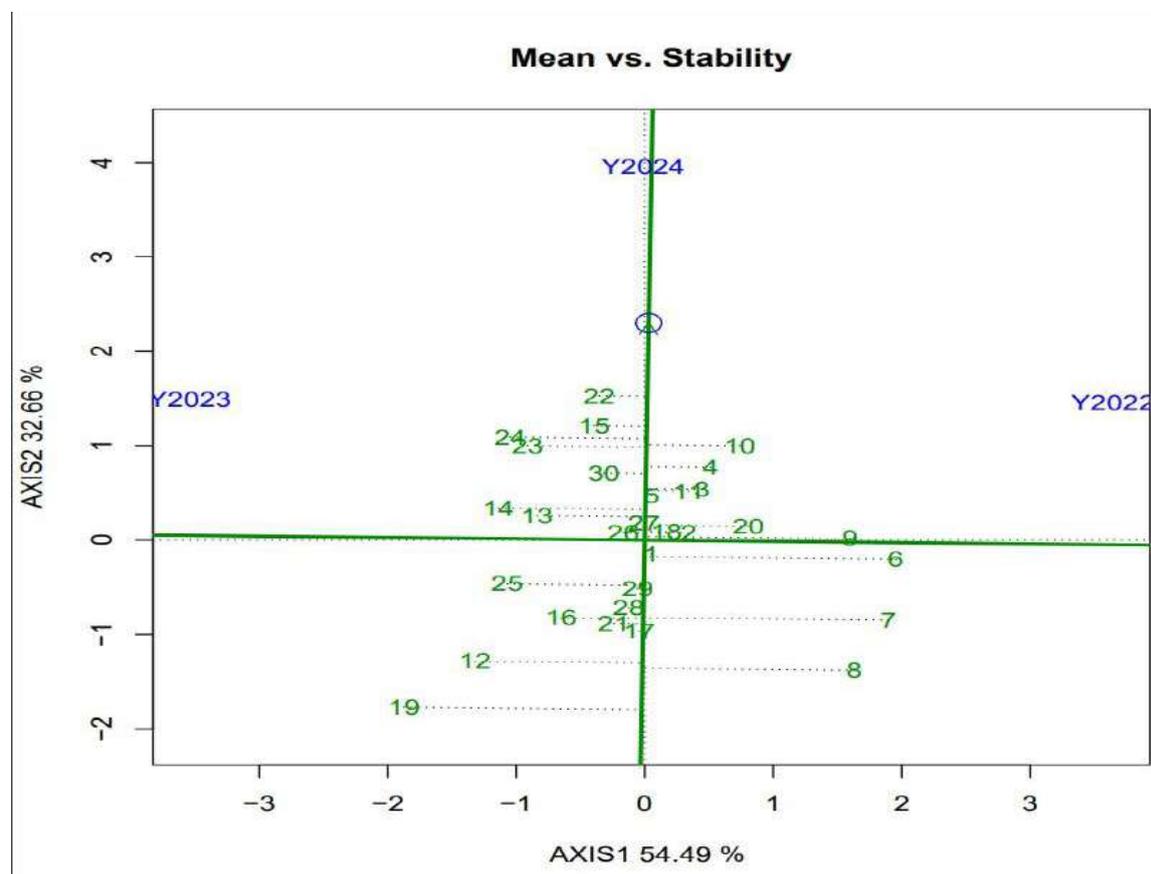


Рис. 2. GGE biplot, отражающий генотип-средовые взаимодействия по схеме «распределение сортов по урожайности и стабильности на основе её средних средовых значений». Ось AXIS1 показывает вклад в дисперсию PC1, ось AXIS2 – PC2. Цифрами 1-30 обозначены номера сортов в соответствии с таблицей №1.

Поскольку условия среды в эксперименте по годам сильно различаются и не образуют мега-среду (когда в одном секторе 2,3 среды), график, отображающий генотип-средовые взаимодействия урожайности и её стабильность совпал с осями (абсцисс, ординат) на плоскости с двухмерной системой координат. Центр пересечения горизонтальной оси

(абсцисс) и вертикальной (ординат) маркирует среднюю урожайность всех генотипов во всех средах. Проходящая через центр биплота вертикальная ось (ординат) со стрелкой показывает среднюю урожайность генотипов по всем средам. Урожайность возрастает при движении вдоль этой оси снизу-вверх. Величина расстояния от точки, маркирующей положение сорта на графике до её проекции на оси ординат, т.е. параллельно абсциссе по обе стороны ординаты, наглядно демонстрирует стабильность генотипа. Минимальные расстояния характерны для сортов с высокой стабильностью, максимальные с низкой. Используемая в данном эксперименте модель взаимодействия генотип-среда может включать компонент отзывчивости на благоприятный комплекс среды, что необходимо учитывать при анализе стабильности сортов. Графический анализ биплота позволяет визуально идентифицировать генотипы, как превышающие, так и уступающие по урожайности средней по опыту. Первые расположены выше оси абсцисс, вторые ниже. В первую группу вошли 16 генотипов в том числе стандарт Безенчукская 210 (Самарский НИИСХ), 4 линий из 5 селекции Краснокутской СС, 7 из 13 линий ФГБНУ ФАНЦА, 3 из 5 линий ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока и одна линия НЦ зерна им.П.П. Лукьяненко из 6 изученных, ещё одна линия этого учреждения (№9) сформировала урожайность зерна равную средней по опыту. Среди первой группы генотипов, превышающих среднюю величину урожайности по опыту, выделяется 5 генотипов с высокой продуктивностью (расположены в верхней части биплота): № 22 (Безенчукская 210-Самарский НИИСХ, стандарт), № 5, № 24, № 23 (Гордеиформе 1082, Гордеиформе 960, Гордеиформе 888) селекции ФГБНУ ФАНЦА и № 10 (837d-125) селекции НЦ зерна им. П.П. Лукьяненко. Группа линий с самой низкой продуктивностью (расположены в нижней части биплота) включает три генотипа: № 19 (Гордеиформе 1094), № 12 (Гордеиформе 1068) селекции ФГБНУ ФАНЦА, № 8 (662d-58) селекции НЦ зерна им.П.П. Лукьяненко.

Среди обеих групп генотипов (превышающих и уступающих средней урожайности по опыту) высокая стабильность (точка маркирующая генотип находится на близком расстоянии от оси ординат) установлена для следующих 16 генотипов: № 22 (Безенчукская 210), № 15 (Гордеиформе 1082), № 4 (Леукурум 3438), № 30 (28), № 11 (841d-14), № 3 (Леукурум 3457), № 5 (Леукурум 3462), №26 (8), № 1 (Гордеиформе 3419), № 27 (9), № 18 (Гордеиформе 1091), № 2 (Леукурум 3417), №29 (27), №28 (15), № 21 (Гордеиформе 829), № 17 (Гордеиформе 1096). Среди высокопродуктивной группы генотипов (находятся в самой верхней части биплота) к высокостабильным можно отнести два генотипа – № 22 (Безенчукская 210) и Гордеиформе 1082 (ФГБНУ ФАНЦА). Высокая стабильность установлена для генотипов значительно превышающих среднюю урожайность по опыту: № 3 (Леукурум 3437), № 5 (Леукурум 3462) и № 11 (847d-14). Высокая стабильность установлена для ряда сортов с урожайностью ниже средней по опыту: № 17 (Гордеиформе 1096), № 21 (Гордеиформе 829, № 28 (15), № 29 (27). Низкая стабильность отмечена у четырех сортов № 7 (656d-11), № 8 (662d-58), № 12 (841d-14), № 19 (Гордеиформе 1094), сформировавших урожайность во всех средах значительно ниже средней по опыту, т.е. в данном случае имеет место сочетание в одном генотипе двух отрицательных свойств – низкая продуктивность и её стабильность.

Третий, исследованный GGE биplot, позволяет визуально оценить отношение изученных линий к «идеальному» генотипу. Биplot разделен концентрическими кругами на окружности с центром, маркированным стрелкой на оси ординат, в котором теоретически располагается «идеальный» генотип (рис. 3).

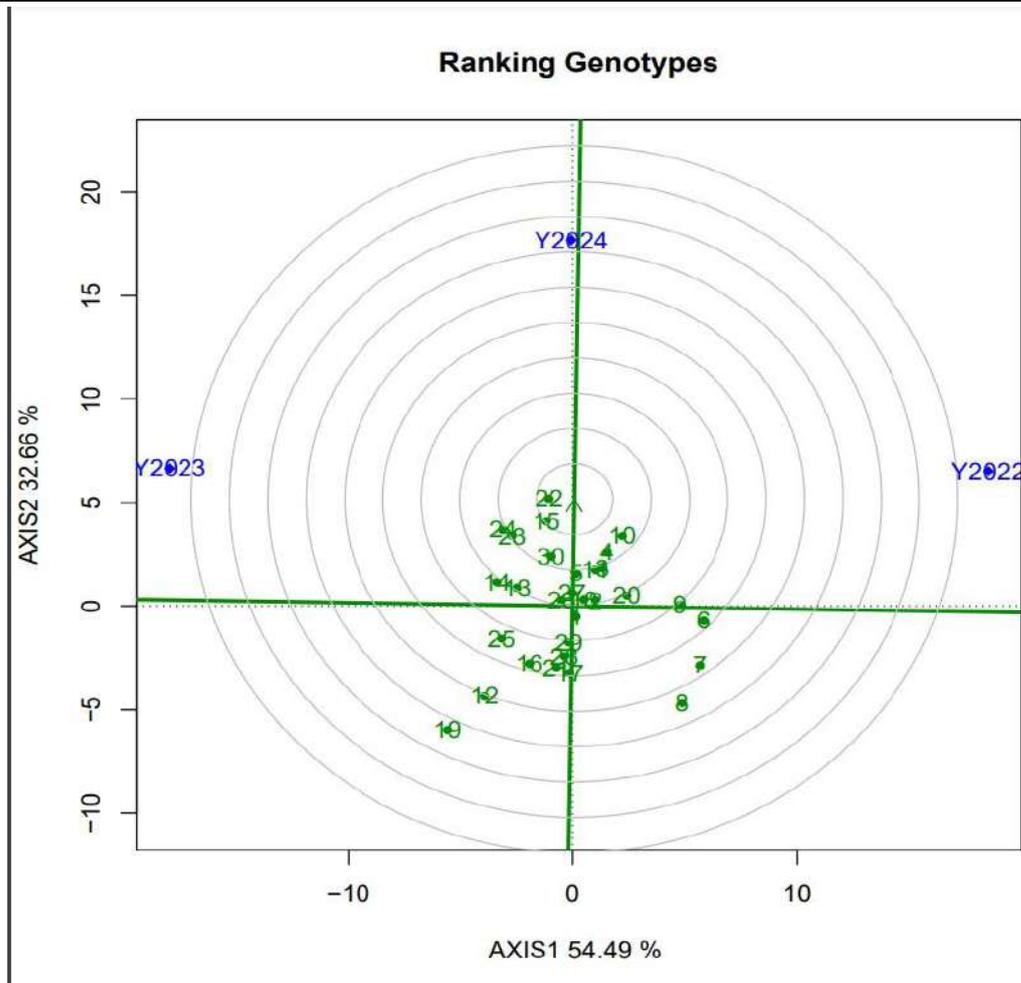


Рис. 3. GGE biplot, характеризующий ранжирование изученных селекционных линий относительно «идеального» генотипа. Ось AXIS1 показывает вклад в дисперсию PC1, ось AXIS2 – PC2. Цифрами 1-30 обозначены номера сортов в соответствии с таблицей №1

Максимально близко к стрелке (в центральной окружности) расположились генотипы: № 22 (Безенчукская 210) и № 15 (Гордеиформе 1082). Эти генотипы были лучшими в среде с минимальной продуктивностью и максимальным давлением стрессовых факторов (Y2024) и по результатам оценки второго биплота были одними из лучших по стабильности урожайности. Во второй окружности от центра биплота находились генотипы №10 (837d-125), № 4 (Леукурум 3438), № 30 (28), № 23 (Гордеиформе 888), № 24 (Гордеиформе 960). Сравнение результатов полученных по генотипам № 15 и № 10, показывает, что при одинаковой средней урожайности (25,9ц/га и 25,8 ц/га), № 15 характеризуется лучшей стабильностью (см.второй биplot) и меньшими различиями с «идеальным» генотипом. В связи с этим можно предположить, что в данном наборе сортов, сред и применяемых статистических методов, акцент оценки генотипов смещен в сторону стабильности. В связи с этим необходимо обратить внимание на генотипы № 3 (Леукурум 3437), № 5 (Леукурум 3462) и № 11 (841d-14), которые отличаются высокой стабильностью и при более низкой урожайности, чем у линий предыдущей группы (вторая окружность от центра), расположены на третьем биplotе в пограничной области второй и третьей окружности от центра биплота. Генотипы с низкой урожайностью и стабильностью № 7 (656d-11), № 8 (662d-58), № 12 (Гордеиформе 1068) и № 19 (Гордеиформе 1094) находились на максимальном удалении от центра, их свойства значительно отличаются от «идеального» генотипа.

Следующий биplot визуализирует дифференцирующую способность сред относительно идеальной в данном наборе генотипов и сред (рис. 4).

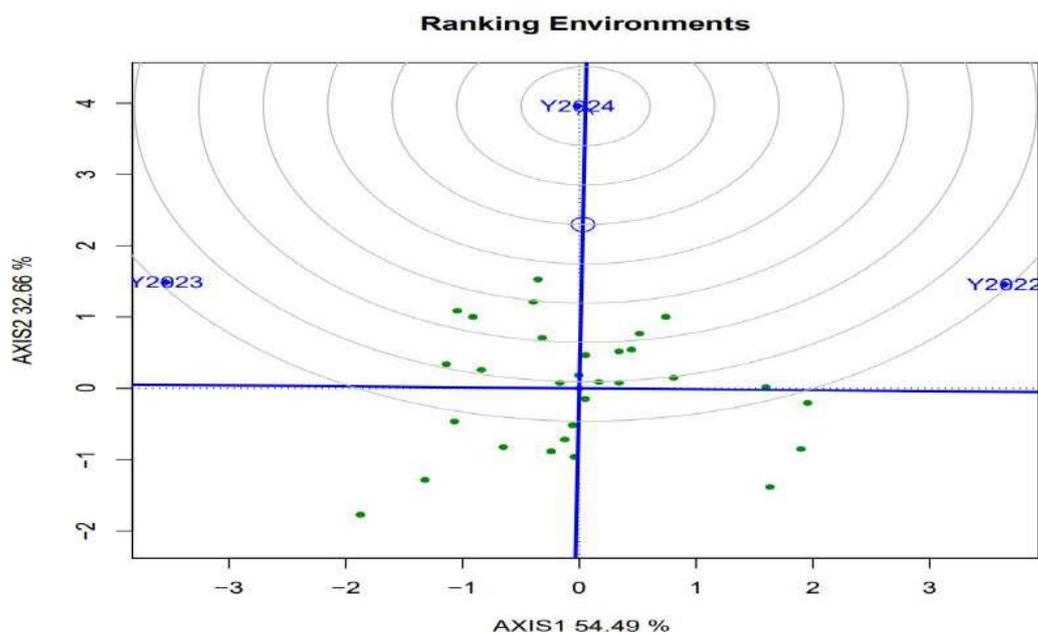


Рис. 4. GGE biplot, характеризующий расположение сред Y2022, Y2023, Y2024 относительно среды с «идеальной» дифференцирующей способностью. Ось AXIS1 показывает вклад в дисперсию PC1, ось AXIS2 – PC2

В центральной окружности биplotа в точке «идеальной» среды располагается среда 2024 года (Y2024). Эта среда характеризуется минимальной в опыте урожайностью и максимальной нагрузкой стрессовых факторов. Её высокая дифференцирующая способность означает присутствие в наборе исследуемых генотипов значительных различий по адаптивности к лимитирующим факторам среды и эффективности отбора в этих условиях устойчивых сортов. Среды Y2022 и Y2023 на биplotе расположены в последней окружности – на максимальном удалении от центра биplotа. Эти среды с максимальной и средней продуктивностью целесообразно использовать для отбора генотипов отзывчивых на благоприятные условия среды с эффектом стабилизации устойчивости.

Заключение

GGE биplot анализ распределения селекционных линий, позволил идентифицировать, следующие генотипы с высокой отзывчивостью на благоприятные условия среды (Y2022=42,1ц/га): 3761h-46, 804d-94 (НЦ зерна им.П.П.Лукьяненко), Гордеиформе 1099, Гордеиформе 1091 (ФГБНУ ФАНЦА), Леукурум 3417 (Краснокутская СС).

Анализ биplotа данных средней урожайности и её стабильности в эксперименте, позволил выделить 16 генотипов, превышающих среднюю урожайность всех сортов по опыту. В эту группу вошли – Безенчукская 210 (Самарский НИИСХ, стандарт), 7 линий из 13 ФГБНУ ФАНЦА, 4 линии из 5 Краснокутской СС, 3 линии из 5 ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока и одна линия НЦ зерна им.П.П. Лукьяненко. Генотипы с максимальной урожайностью в опыте Безенчукская 210 и Гордеиформе 1082 (ФГБНУ ФАНЦА), обладают достаточно высокой стабильностью. Среди генотипов значительно превысивших среднюю урожайность по опыту самой высокой стабильностью характеризовались – Леукурум 3437, Леукурум 3462 и 847d14, созданных, первые два, на Краснокутской СС и в НЦ зерна им. П.П. Лукьяненко.

Свойства генотипов Безенчукская 210 и Гордеиформе 1082 (ФГБНУ ФАНЦА) были близки к «идеальному» генотипу. К этим сортам в координатах «идеального» генотипа были близки линии – 837d-25 (НЦ зерна им.П.П. Лукьяненко), Леукурум3438 (Краснокутская СС), № 28 (ФГБНУ НИИСХ Юго-Востока), Гордеиформе 888, Гордеиформе 960 (ФГБНУ ФАНЦА).

Среда Y2024 с максимальным набором лимитирующих факторов соответствовала по дифференцирующей способности «идеальной». Отборы в условиях 2024 года должны быть эффективными для формирования набора генотипов, устойчивых к стрессовым факторам.

Среды Y2022, Y2023 целесообразно использовать для отбора генотипов, отзывчивых на благоприятные условия среды.

Идентифицированные генотипов (приведены выше) целесообразно использовать в селекции твердой пшеницы в Самарском НИИСХ в качестве базовых генотипов для расширения генетического разнообразия создаваемых сортов.

Исследования выполнены по Государственному заданию и при поддержке научного фонда № 23-16-000-41 (<https://rscf.ru/project/23-16-00041/>).

Литература

1. Tshikunde NM, Mashilo J, Shimelis H, et al. Agronomic and Physiological Traits, and Associated Quantitative Trait Loci (QTL) Affecting Yield Response in Wheat (*Triticum aestivum* L.): A Review // *Front.Plants Sci.* [Internet].-2019.-[cited-2024 July20] 10:1428. Doi:10.3389/fpls.201901428
2. Voss-Fels KP, Stahl A, Wittkop B, et al. Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels // *Nature Plants* [Internet]. – 2019. - [cited 2024 July25] Vol 5. - P.706-714 doi.org/10.1038/s41477-019-0445-5
3. De Vita P., Mastrangelo A.M., Matteu L., Mazzucotelli L.E., Virzì N., Palumboc M., Storto M. Lo., Rizza F., Cattivelli L. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy // *Field Crops Res.* [Internet] - 2010.- [cited 2024 July20]. Vol.119.- P.68-77. DOI 10.1016/j. fcr.2010.06.016
4. Moreno-González J., Crossa J., Cornelius P.L. Genotype × environment interaction in multi-environment trials using shrinkage factors for AMMI models // *Euphytica.* [cited 2024 July20] - V.137. - Issue Date: June 2004.- P.137-149.
5. Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications // *Can. J. Plant Sci* [Internet]. – 2006. - [cited 2024 July20] V.86.-P.623-645. DOI 10.4141/P05-169
6. Солонечный П.Н. AMMI и GGE biplot анализ взаимодействия генотип– среда линий ячменя ярового // *Вавиловский журнал генетики и селекции.* – 2017. – № 21 (6). – С. 657-662. DOI 10.18699/ VJ17.283
7. Гудзенко В.Н. Статистическая и графическая (GGE biplot) оценка адаптивной способности и стабильности селекционных линий ячменя озимого // *Вавиловский журнал генетики и селекции.* – 2019. – № 23 (1). – С. 110-118.DOI 10.18699/VJ19.469

References

1. Tshikunde NM, Mashilo J, Shimelis H, et al. Agronomic and Physiological Traits, and Associated Quantitative Trait Loci (QTL) Affecting Yield Response in Wheat (*Triticum aestivum* L.): A Review. *Front.Plants Sci.* [Internet].-2019.-[cited 2024 July20] 10:1428. Doi:10.3389/fpls.201901428
2. Voss-Fels KP, Stahl A, Wittkop B, et al. Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nature Plants* [Internet]. – 2019. - [cited 2024 July25] Vol 5. - P.706-714 doi.org/10.1038/s41477-019-0445-5
3. De Vita P., Mastrangelo A.M., Matteu L., Mazzucotelli L.E., Virzì N., Palumboc M., Storto M. Lo., Rizza F., Cattivelli L. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Res.* [Internet] - 2010.- [cited 2024 July20] Vol.119.- P.68-77. DOI 10.1016/j. fcr.2010.06.016
4. Moreno-González J., Crossa J., Cornelius P.L. Genotype × environment interaction in multi-environment trials using shrinkage factors for AMMI models. *Euphytica* [Internet]. - 2004. [cited 2024 July20] - V.137. - Issue Date: June 2004.- P.137-149.
5. Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant Sci* [Internet]. - 2006.- [cited 2024 July20] V.86.-P.623-645. DOI 10.4141/P05-169
6. Solonechnyi P.N. AMMI and GGE biplot analyses of genotype-environment interaction in spring barley lines. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii =Vavilov Journal of Genetics and Breeding.* 2017;21(6):657-662. DOI 10.18699/VJ17.283 (in Russian)
7. Gudzenko V.N. Statistical and graphical (GGE biplot) evaluation of the adaptive ability and stability of winter barley breeding lines. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii=Vavilov Journal of Genetics and Breeding.* 2019;23(1):110- 118. DOI 10.18699/VJ19.469 (in Russian)