

## Индексна селекция за добив и стабилност при самоопрашени линии и хибриди царевица

Стефан Вълчинков, Желязко Вълчинков\*

Селскостопанска академия, Институт по царевицата – Кнежа

\*E-mail: los\_23@abv.bg

### Резюме

Направена е индексна оценка на добива на зърно и стабилността му при 11 самоопрашени линии и 25 царевични хибриди от късната група (FAO над 600), изпитани за 3 години при 9 различни условия на средата. Използвани са два индекса – за обща адаптация ( $x_i - b_i$ ) и индекс на стабилност (I). Дисперсионният анализ показва достоверни стойности на вариансите за всички фактори – линии, хибриди, условия, тяхното взаимодействие ( $G \times E$ ), както и за диференциран вариант на взаимодействието на линейна и нелинейна част. Между добива и двата индекса, както и между тях се наблюдават достоверни корелации. Клъстер анализът и рангуването на генотиповете дават много сходна информация при класирането на материалите по висок добив и фенотипна стабилност.

Клъстерният анализ на линиите и хибридите само по двата индекса потвърждава направените селекционни оценки.

**Ключови думи:** селекционни индекси; взаимодействие генотип x среда; линии и хибриди царевица

## Index selection for yield and stability of maize inbred lines and hybrids

Stefan Vulchinkov, Zhelyazko Vulchinkov\*

Agricultural Academy, Maize Research Institute – Kneja, Bulgaria

\*E-mail: los\_23@abv.bg

### Citation

Vulchinkov, S., & Vulchinkov, Zh. (2023). Index selection for yield and stability of maize inbred lines and hybrids. *Bulgarian Journal of Crop Science*, 60(3) 40-51 (Bg).

### Abstract

An index assessment of grain yield and its stability of 11 inbred lines and 25 maize hybrids of the late group (FAO over 600), tested for 3 years under 9 different environmental conditions was made. Two indices were used – for general adaptation ( $x_i - b_i$ ) and stability index (I). The performed ANOVA analysis points out significant values of the variances for all factors – lines, hybrids, environments, their interaction ( $G \times E$ ), as well as for differentiated variance of the interaction of linear and non-linear part. Significant correlations are observed between yield and the two indices, as well as between them. The cluster analysis and ranking of genotypes give very similar information in the rating, respectively in the grouping of the materials according to high yield and phenotypic stability.

The cluster analysis of the lines and hybrids only by the two indices confirms the selection evaluations made.

**Key words:** selection indices; G x E interaction; maize lines and hybrids

## ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на селекционни индекси при създаването на нови сортове растения има няколко основни цели:

- Прогноза на нови качества или стойности на перспективни източници на селекция
- Установяване на максимална полза от всеки вторичен или съпътстващ признак, обект на селекция
- Да се предоставят ясни правила за селекционера при оценка на материалите по няколко признака едновременно

При селекцията на растенията най-често се използват фенотипни индекси от линеен тип, които синтезират информация от няколко (най-малко два) признака, като между тях може да има или да няма връзка (Céron-Rojas & Crossa et al, 2018; Céron-Rojas & Crossa, 2022). Индексната селекция е инструмент в работата на учениците, който може да преработи голямо количество данни получени в селекционния процес, като разшири неговата ефективност и обективност и да увеличи ползата от новосъздадените форми (Baker, 1986).

Индексните оценки са много важни, когато новите кандидат-сортове не се отличават достоверно от стандартите в процеса на изпитване за стопански качества. При царевичката например такъв е показателят „*performance index*” ( $pi$ ), който представлява отношение на зърнения добив към влагата в зърното, което означава, че при еднакъв добив предимство получават хибридите с по-ниска влага при прибиране (Lee et al., 2001). Между двата признака най-често не се наблюдават достоверни корелации.

Има разработени много селекционни индекси, които третират едновременно продуктивността, добива и неговата стабилност. Kang (1991) и Kang & Phan (1991) предлагат метод на ранговите суми при селекцията на високодобивни и стабилни генотипове, като тази сума е сбор от добива и първия параметър на стабилност ( $\sigma_i^2$ ) по модела на Shukla (1972) с известни модификации. Методът на ранговите суми е по-ефективен и прецизен при най-малко 10 на брой условия на средата. По подобен начин Vulchinkov (1990) предлага метод за класиране на генотипове с относително висок и стабилен добив като разлика между средния размер на признака за

даден генотип и първия параметър на стабилност от модела на Eberhart & Russell (1966), който по-късно е наречен индекс за обща адаптация ( $x_i \cdot b_i$ ) (Vulchinkov & Vulchinkova, 2007). Tsenov & Atanasova (2015) прилагат подобен индекс на обща стабилност (“*general stability*”;  $GY - \sigma_i^2$ ) при оценка на стабилността на съвременни сортове пшеница.

Dragavtsev & Aver'yanova (1983) въвеждат *коэффициент на мултипликация* ( $A_i$ ) с цел да се избегне наблюдаваната положителна корелация между средния размер на признака и стойността на регресионния коефициент ( $b_i$ ), което се смята като недостатък на модела на Eberhart & Russell (1966). Kilchevsky & Khotyleva (1985) предлагат термините *специфична адаптация* и *селекционна ценност на генотиповете*, като алтернативни индекси. Други индекси, свързани с добива и неговата стабилност, предлагат: Lidanski & Noveva (1990) – относителен размах ( $Rm$ ); Fasoulas (1993) и Fasoula et al. (1993) – комбиниран критерий ( $cc$ ); Fasoula (2013) – индекс на стабилност – ( $x/s^2$ ). Lunezzo de Oliveira et al. (2014) предлагат *genotype-idiotypic distance index* (GIDI), чиито оценки комбинират адаптивност и стабилност при изпитване на царевични хибриди.

Vajpai & Prabhakaran (2000) предлагат индекс на стабилност ( $I$ ), целящ едновременна селекция на високодобивни и стабилни генотипове. Във формулата му са включени добивът на конкретния генотип, генералната средна от опита и първия параметър на стабилност ( $\sigma_i^2$ ) от подела на Shukla (1972).

Mendes et al. (2012) използват метод на претеглените суми за определяне адаптивната способност и стабилност на царевични генотипове. Сортовете със среден добив над средния от стресови условия и над средния от благоприятни условия са едновременно стабилни и адаптивни.

Purchase et al. (2000) разработват показателя *AMMI stability value* ( $ASV$ ), на основата на *AMMI* модела (*Additive Main effect and Multiplicative Interaction*), при който се използва едновременно дисперсионен и принципен компонентен анализ (*PCA*) – като количествен параметър на този модел, с цел да се ранжират генотиповете по стабилността на добивите им. В проучването на Bose et al. (2014) индексът на стабилност ( $I$ ) е

в една група с *ASV*, потвърдено от изследванията на Rea et al. (2020) след направен принципен компонентен анализ (*PCA*).

Mahmodi et al. (2011) въвеждат индекс на стабилност (*YSI*) – непараметрична мярка като рангова сума от *ASV* и добива при генотипове пшеница, изхождайки от предположението, че най-високодобивният генотип не е и най-стабилният, което е показано от регресионни модели, както и от други методи (Finlay & Wilkinson, 1963; Eberhart & Russell, 1966; Lunizzo de Oliveira et al. (2014).

В обзора на Pour-Aboughadareh et al. (2022) в обобщен вид са представени набор от над 30 параметрични и непараметрични модели, публикувани в период от 1917 г. до 2019 г., анализиращи ефектите на взаимодействието генотип – среда (*G x E*) при опити обхващащи широк кръг от условия на средата (*MET*). Посочени са и софтуерните пакети, използвани за изчисляването на стабилността на генотиповете. Допълнителна информация за тези и други модели може да се открие и в обзора на Cheshkova et al. (2020).

Подробна оценка на ефективността и приложимостта на селекционните индекси при селекцията на растенията по групи е направена от Tsenov et al. (2022a), както и сравнение на статистическите параметри за оценка на добива и стабилността при зимната пшеница (Tsenov et al., 2022c). Тези оценки са от особена важност за райониране на сортовете със специфична или обща адаптация.

При определянето на фенотипната (агрономическа) стабилност селекционните индекси най-често се прилагат с рангов или клъстерен анализ като непараметрични методи (Farshadfar et al., 2014).

Цел на настоящето проучване е да се направи оценка на стабилността и добива при линии и хибриди царевица с два индекса – за обща адаптация ( $x_i, b_i$ ) и индекс на стабилност (*I*) по модела Вайраи & Прабхакаран (2000); да се сравни тяхната ефективност и възможности за съвместно приложение.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

В проучването са използвани резултати от полски опити със самоопрашени линии и хи-

бриди царевица. Единадесет самоопрашени линии и двадесет и пет хибрида са изпитани при девет условия на средата, включващи 3 години и различни гъстоти при поливни и неполивни условия. Опитите са изведени в рандомизиран блок, в 3 повторения и 10m<sup>2</sup> реколтна парцелка. Линиите са от три хетерозисни групи: Lancaster (L), Reid (SSS) и др. Хибридите са три типа кръстоски: 4 трилинейни, 7 двулинейни (близкородствени) и 14 двулинейни високохетерозисни за добив. Подробно описание може да се намери в предходно проучване (Vulchinkov, 2000). На добива на зърно е извършен двуфакторен дисперсионен анализ с включен вариант на повторенията в условията и диференциран вариант на взаимодействието генотип-среда (Perkins & Jinks 1968; Hallauer, 1988; Hallauer et al., 2010). Според последните автори степените на свобода на повторенията в условията са:  $n(r-1)$  – условия ( $n$ ) и повторения ( $r$ ).

Индексът за обща адаптация (Vulchinkov, 1990; Vulchinkov & Vulchinkova, 2007) представлява разлика ( $x_i - b_i$ ) между средния добив на конкретния генотип от опита и коефициента на линейна регресия  $b_i$  – първият параметър на стабилност по модела на Eberhart & Russell (1966).

Индексът на стабилност (по Вайраи & Прабхакаран, 2000) е изчислен по следната формула:

$$I = \frac{\left[ \frac{\bar{y}_i}{\bar{y}} + \frac{1}{\sigma_i^2} \right]}{\left[ \frac{1}{n} \sum \left( \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \right]}$$

където  $\sigma_i^2$  е първият параметър на стабилност по модела на Shukla (1972),

$\bar{y}_i$  – средният добив на проучвания генотип,

$\bar{y}$  – средният добив от опита,

$n$  – брой генотипове в опита.

Добивът е отчетен в t/ha.

Индексните оценки на линиите и хибридите са рангувани, като класирането е в низходящ ред. Йерархичният клъстерен анализ по Ward (1963) групира линиите и хибридите по сходните оценки на двата индекса и добива. На резултатите е извършен и корелационен анализ. За обработката на данните са използ-

вани софтуерните пакети SPSS 19 и Microsoft Excel.

## РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

Резултатите от дисперсионния анализ на добива при двете генетични групи – линии и хибриди са представени в таблица 1. Видно е, че всички варианси – на генотиповете, на условията на средата и тяхното взаимодействие са достоверни. Това предполага достоверни разлики в добива между изследваните генотипове, между условията на отглеждане, както и различна реакция на линиите и хибридите при промяна в условията на средата, също така че анализът на стабилността на генотиповете може да бъде извършен.

При такъв род изпитвания, опити провеждани при много и различни условия (*MET*), тяхното вариране е по-голямо, отколкото на генотиповете, съответно заемащо по-голям дял от общото вариране (Ilker et al. 2009; Hallauer et al., 2010; Mitrović et al., 2012). Скорошни изследвания при пшеницата потвърждават този факт (Uhr, Zl. et al., 2021, Tsenov et al., 2022b). Rao et al. (2004) съобщават за много по-високи стойно-

сти на варианса на условията, спрямо генотипния вариант и тяхното взаимодействие ( $G \times E$ ) за седем от осем проучвани признака при слънчогледови хибриди. Нашите резултати не правят изключение в това отношение. По абсолютна стойност размерът на варианса на условията на средата при линиите и хибридите е от 7 до 14 пъти по-висок спрямо генетичният им вариант (табл. 1). Нелинейната част на взаимодействието генотип – среда (баланс) преобладава над линейната му част (хетерогенност), показано и в предходно наше изследване (Vulchinkov et al., 2021). В обширно проучване на 31 публични и exPVP инбредни линии по 14 количествени признака при 36 условия, основно в Средния Запад на САЩ, Falcon et al. (2020) докладват, че средният вариант на условията е около 39,17 % от общото вариране; генотипният вариант е средно около 27,85 %; вариантът на взаимодействието генотип – среда е 14,67 %, като за някои от проучените признаци не обхваща мнозинството от варирането. Вариантът на повторенията в условията е с най-малък дял от общото вариране (средно 3,68 %), като не е достоверен за всички признаци. Подобна структура на дисперсионния анализ има и в съобщението на Fan et al. (2007), които изследват стабилността на доби-

**Таблица 1.** Стойности на вариансите за добив зърно (t/ha) от обединен дисперсионен анализ по Perkins & Jinks (1968) и Hallauer (1988) за 11 самоопрашени линии и 25 царевични хибрида, изпитани при 9 условия на средата

**Table 1.** Variances of grain yield (t/ha) from joint ANOVA (Perkins & Jinks 1968; Hallauer, 1988) for 11 inbred lines and 25 maize hybrids tested at 9 environmental conditions

Вариране / Variation	Самоопрашени линии / Inbred lines		Хибриди / Hybrids	
	<i>df</i>	Варианс / Variance	<i>df</i>	Варианс / Variance
Общо / Total	296		899	
Генотипове / Genotypes	10	28,845 <sup>++</sup>	24	65,5257 <sup>++</sup>
Повторения в условията / Reps. in environments	18	0,873	8	918,6134 <sup>+</sup>
Условия / environments	8	210,799 <sup>++</sup>	27	4,2451 <sup>++</sup>
Генотипове x условия / G x E	80	3,879 <sup>++</sup>	192	5,1279 <sup>++</sup>
Хетерогенност / Heterogeneity	(10)	2,112 <sup>++</sup>	(24)	4,6022 <sup>++</sup>
Баланс / Balance	(70)	4,131 <sup>++</sup>	(168)	5,2030 <sup>++</sup>
Грешки / Errors	180	0,749	648	1,5726

Достоверност на вариансите при  $P = 5\%$  (\*),  $P = 1\%$  (\*\*)  
Significance of variances at  $P = 5\%$  (\*),  $P = 1\%$  (\*\*)

ва при царевични хибриди в Китай, като делът на нелинейните взаимодействия (residual) доминира над линейните (heterogeneity). Нашите резултати от табл. 1 са в добро съгласие с тези автори. Въпреки ниските стойности на варианса на повторенията в условията в някои случаи, те са от особено значение за точността на опитите, защото намаляват варианса на грешката (Hallauer, 1988; Hallauer et al., 2010). Някои автори не включват варианса на повторенията в условията в анализите си (или не го публикуват), като обръщат внимание само на дисперсиите на генотипа, средата и тяхното взаимодействие (GxE). В други случаи, при голям брой степени на свобода на това взаимодействие (при доста пространно изпитване, на много места, с много сортове) може да се получи недостоверен варианс на взаимодействието, но анализите са продължени (Zobel et al., 1988).

Таблицы 2 и 3 представят резултатите от подреждането на линиите и хибридите по добив на зърно и изчислените два индекса, както и крайните им класации по рангова сума. Преди да ги обсъдим трябва да обърнем внимание на формулата за изчисляване на индекса на стабилност (I). В нея има една особеност, която не се забелязва веднага. Първият параметър на стабилност ( $\sigma_i^2$ ) по модела на Shukla (1972), който е включен във формулата, има теоретична стойност равна на нула. Ако параметърът  $\sigma_i^2$  има действително такива изчислени стойности, то действието делене, където  $\sigma_i^2$  е знаменател, не може да се извърши и формулата се опростява до едно отношение на средния добив на въпросния генотип към средната от опита.

Когато подобни индекси за стабилност представляват (най-често) алгебрична сума или частно от добива и параметър на стабилност, представен като регресия, дисперсия или друга статистика, при стойности на параметрите близки до теоретичните, се очакват високи стойности на тези индекси като показател за добив и стабилност. Например Greveniotis et al. (2022), които при оценка на стабилността на признаци при царевичката използват индекса на стабилност на Fasoula (2013), при ниски стойности на средното квадратно отклонение ( $S^2$ ) в знаменател, клонящи към нула, стойността на индекса може клони към безкрайност, което затруднява селекционните оценки.

В екологичната генетика се среща и феноменът някои параметри на стабилност, които представляват варианси ( $\sigma_i^2$ ,  $S_i^2$  и др.) да имат изчислени и по съответните формули отрицателни стойности, които автоматично се приемат за нула (Vulchinkov, 2000, по Russell, 1987 – устно съобщение).

Нашите изчисления на параметъра  $\sigma_i^2$  и в двата опита не показаха случаи с отрицателни стойности, като съответно изчислените стойности на индекса за стабилност (I) са посочени в таблици 2 и 3. Този индекс, макар и не много известен, е използван при многостранна оценка на стабилността и добива при слънчогледа (Rao et al. 2004), пшеницата (Mahmodi et al., 2011), ориза (Bose et al., 2014) и захарната тръстика (Rea et al., 2020).

Ние не случайно се спряхме на този индекс, защото във формулата му е включен именно първият параметър на стабилност ( $\sigma_i^2$ ) от модела на Shukla, 1972. Наше обстойно проучване на линии и хибриди царевичка (Vulchinkov, 2000) показва, че този модел по-прецизно посочва генотиповете с достоверни параметри на стабилност спрямо модела на Eberhart & Russell (1966). В случаите на генотипове с достоверно различни от теоретичните стойности параметри на стабилност показани в последния модел се потвърждават от Shukla – модела, като към тях се прибавят и други, т.е. обхватът му е по-голям при доказан по-голям дял при нелинейните взаимодействия (баланс).

Известно е, че параметърът  $\sigma_i^2$  е произведен на ековаленса ( $W_i$ ) на Wricke (1962). За първи път тази връзка е показана от Kang et al. (1987). В наше скорошно съобщение (Vulchinkov et al., 2022) също се установи, че корелационната връзка между  $\sigma_i^2$  и  $W_i$  е почти единица. Ако се замени във формулата за изчисление на индекса на стабилност (I) параметърът  $\sigma_i^2$  с ековаленса ( $W_i$ ) може да се очакват сходни оценки на стабилността на генотиповете, но това става обект на друго изследване.

Към табл. 2, представяща добива на зърно и двата индекса при самоопрашените линии, са включени и ранговете им по добив и индексните оценки, съответно. Трябва да се отбележи, че тези оценки на линиите са „*per se*“, т.е. без тяхната комбинативна способност. В селекцията на царевичката „*анриопи*“ е прието, че най-ви-

сокодобивните линии не винаги имат и висока комбинативна способност (по-скоро са изключение). Постигнатият прогрес в селекцията обаче води до сближаване на тези две тенденции, т.е. новите поколения самоопрашени линии, участващи в хибриди са както относително високодобивни, така и с добра адаптивна способност, което е от голямо значение за семепроизводството (Hallauer et al., 2010; Hallauer, 2011).

Класираната на първо място по добив линия номер 11 (B55) има и ранг 1 и 2 от двата индекса и е на първо място в крайното класиране с най-малка рангова сума. Класираните на второ и трето място са линиите (2) и (5) или 23-149/77В и 527-44/77 В. Само последната от трите линии е участвала в семепроизводството на хибрид Кн 711. От линиите, които имат актуално участие в хибридно семепроизводство на четвърта позиция е 23/78 В – относително високодобивна и с добра адаптивна способност. Тя участва в три регистрирани хибрида – Кн М 611, Кн 619 и Кн М 625. Останалите линии, участващи в хибридни комбинации са на по-задни позиции.

Линиите В 73 и В 84 са на 8 и 9 позиция във всички класации – по добив, по двата индекса и във финалните рангове. Линиите Мо 17 и С-103 имат еднакви рангове по всички индекси и са на 10 и 11 място в крайното класиране.

Извършеният клъстерен анализ на линиите по добив и двата индекса показва много сходна информация с ранжирането им. От дендрограмата на фигура 1 се виждат два оформени клъстера, като всеки има по два подклъстера. Последните четири коментирани линии са в първия клъстер – нискодобивни линии са с по-слаба адаптивна способност. Другият клъстер съдържа седем линии (или около 64% от всички), които са по високодобивни и с по-добра стабилност. От тях в подклъстера с трите линии (11,2 и 5) са включени същите генотипове, класирани на първите три места от табл. 2.

На табл. 3 по аналогичен начин са представени данните от добива и двата индекса при проучените 25 хибрида. Както бе споменато по-горе хибридите са от три типа: 4 простолинейни (първите в списъка); 7 близкородствени и 14

**Таблица 2.** Класиране на 11 самоопрашени линии по добив на зърно (t/ha) и по индексите за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ), за стабилност (I) и по рангова сума

**Table 2.** Ranking of 11 inbred lines by grain yield (t/ha) and by indices of general adaptation ( $x_i-b_i$ ), stability (I) and rank-sum

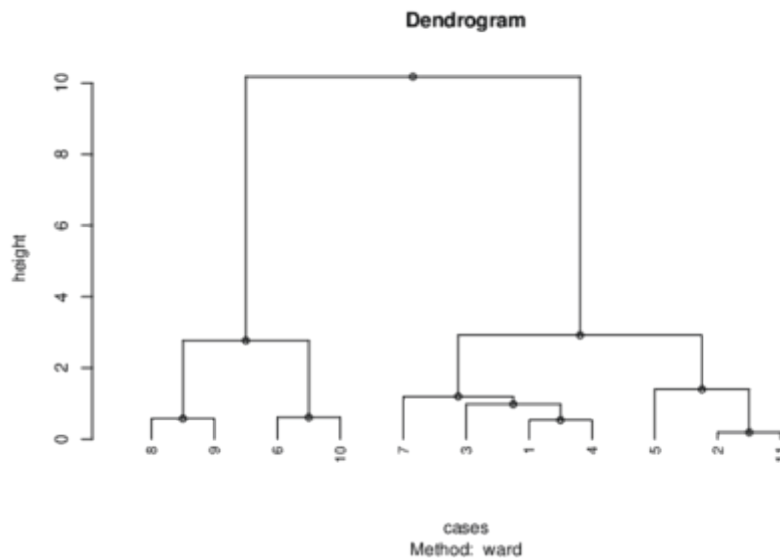
Линии / Lines Генетични източници / Genetic sources	x (t/ha)	Ранг/ rang	$x_i-b_i$	Ранг / rang	I	Ранг / rang	Рангова сума / Rank-sum	Ранг / Rang
1. 23/78 В*	4.399	5	3.504	3	3.424	5	13	4
2. 23-149/77 В*	4.838	3	3.804	2	4.330	3	8	2
3. 23-245/77 В*	4.101	6	3.110	5	4.047	4	15	5
4. 527/64 В*	4.012	7	3.288	4	3.121	6	17	7
5. 527-44/77 В*	4.681	4	2.913	7	4.876	1	12	3
6. Мо 17 (L)	2.416	10	1.650	10	1.779	10	30	10
7. 7-20/82 В (L)	4.906	2	3.085	6	2.918	7	15	6
8. В-73 (S)	3.732	8	2.369	8	2.461	8	24	8
9. В-84 (S)	3.219	9	2.117	9	2.385	9	27	9
10. С-103 (L)	1.970	11	1.301	11	1.549	11	33	11
11. В-55 (L)	5.026	1	3.864	1	4.348	2	4	1
av	3.935		2.818		3.203			
CV, %	26.0		30.3		34.5			

LSD, 5 % 0.46

LSD, 1% 0.61

LSD, 0.1 % 0.79

L – Lancaster; S – Reid; \* - други / others



**Фигура 1.** Клъстерен анализ на 11 самоопрашени линии по добив на зърно (t/ha) и по индексите за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ) и за стабилност (I)

**Figure 1.** Cluster analysis of 11 inbred lines by grain yield (t/ha) and by indices of general adaptation ( $x_i-b_i$ ) and stability (I)

високохетерозисни двулинейни хибриди (близкородствените са означени с една звездичка). Първите три места по добив заемат хибридите номер 20, 17 и 11. В крайното класиране по ранг в челната тройка са хибридите 7, 11 и 18, като първият от тях е Кн 613. Оценките му за добив и много добра екологична стабилност (Vulcinkov, 2000) се потвърждават и от индекса за стабилност (I). Той е показал еднакъв ранг с индекса за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ). Класираният на първо място по добив хибрид № 20 се мести на пето място по ранг за добив и стабилност, т.е. неговата адаптивна способност е по-ниска.

Класираните на последните три места (23, 24 и 25 позиция по ранг) са хибридите № 19, 22 и 13. Те имат еднакви оценки и за добив, и по двата индекса. Те са от групата на близкородствените хибриди, с което се потвърждава постулата от екологичната генетика, че имат по-нисък адаптивен потенциал (Zhouchenko, 1980).

Хибридите № 17 и 18 – Н708 и Кн 614 имат в крайното класиране шесто и трето място, като първият има по-слаби оценки за обща адаптация и стабилност, макар и малко по-високодобивен от втория, с което се потвърждава по-високата адаптивна способност на Кн 614, показана и от Томов (1993).

На дендрограмата (Фиг. 2) от извършения клъстер анализ на хибридите по трите показателя (добив и двата индекса) се виждат два клъстера. Първият от тях има 8 хибрида, които са нискодобивни и със слаба адаптация, като единият подкълстер съдържа хибридите № 13, 19 и 22, които са с най-ниските рангове от табл. 3, съответно. От общо осемте хибриди в този клъстер шест са близкородствени, което показва добра съгласуваност между резултатите от ранговия и клъстерен анализи. Останалите 17 хибрида в другия клъстер (68 %) са по-високодобивни и с по-добра стабилност, като подгрупата от трите хибрида с номера 7, 11 и 18 са тези класирани на първите три места в табл. 3.

Наличието на сходни оценки, които показва двата индекса по отношение на стабилността и адаптивната способност и при линиите, и при хибридите, се доказват и с проведения корелационен анализ, посочен в таблица 4. Стойностите на коефициентите на корелация между добива и двата индекса, както и между самите индекси, са положителни и високо достоверни и при линиите (табл. 4,А) и при хибридите (табл. 4,В), като във втората група имат по-високи стойности.

Наличието на положителна корелация между добива и индекса за обща адаптация ( $x_i - b_i$ ) е по-

**Таблица 3.** Класиране на 25 хибрида по добив на зърно (t/ha) и по индексите за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ), за стабилност (I) и по рангова сума

**Table 3.** Ranking of 25 hybrids by grain yield (t/ha) and by indices of general adaptation ( $x_i-b_i$ ), stability (I) and rank-sum

Хибриди / Hybrids	x (t/ha)	Ранг / Rang	$x_i-b_i$	Ранг / Rang	I	Ранг / Rang	Рангова сума / rang-sum	Ранг / Rang
1.***	6.810	17	5.883	15	4.393	16	48	17
2.***	7.455	11	6.235	13	4.471	15	39	13
3.***	6.292	19	5.292	19	3.922	18	56	19
4.***	6.811	16	5.666	18	5.376	5	39	14
5.*	6.953	15	5.864	16	4.614	12	43	16
6.*	5.483	22	4.553	22	3.12	22	66	22
7. Кн 613**	8.113	4	7.119	1	6.302	1	6	1
8.**	7.110	14	6.397	10	3.965	17	41	15
9.**	7.753	7	6.665	6	5.468	3	16	4
10.**	7.729	8	6.623	8	5.21	7	23	7
11.**	8.221	3	7.099	2	5.775	2	7	2
12.**	7.504	10	6.381	11	5.343	6	27	10
13.*	3.806	25	3.361	25	2.087	25	75	25
14. Кн 711**	6.452	18	5.752	17	3.685	20	55	18
15.**	7.699	9	6.626	7	5.179	8	24	8
16.*	5.849	20	5.018	20	3.498	21	61	20
17. Н-708**	8.236	2	6.909	5	4.589	14	21	6
18. Кн 614**	8.054	5	6.922	4	5.392	4	13	3
19.*	4.092	23	3.549	23	2.359	23	69	23
20.**	8.427	1	6.978	3	4.592	13	17	5
21.**	7.765	6	6.525	9	4.883	10	25	9
22.*	3.995	24	3.467	24	2.325	24	72	24
23.*	5.631	21	4.615	21	3.827	19	61	21
24.**	7.393	12	6.294	12	4.753	11	35	11
25.**	7.255	13	6.189	14	4.916	9	36	12
av	6.835		5.838		4.399			
CV, %	19.7		19.6		25.0			

LSD, 5 % 0.58

LSD, 1 % 0.76

LSD, 0.1 % 0.97

\*\*\* - трилинейни хибриди; three-way crosses \*\* - двулинейни високохетерозисни; single crosses \* - близкородствени хибриди; close related hybrids

**Таблица 4.** Коэффициенты на корелация между добива ( $x_i$ ), индекса за обща адаптация ( $b_i$ ) и индекса за стабилност (I) при: А) – самоопрашени линии; В) – хибриди

**Table 4.** Correlation coefficients between yield ( $x_i$ ), general adaptation index ( $b_i$ ) and stability index (I) at: A) inbred lines; B) – hybrids

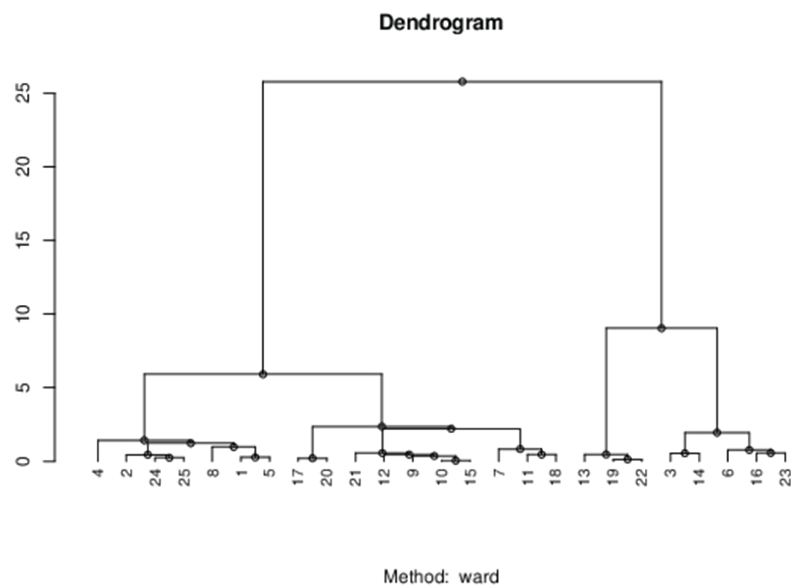
Показатели / Indicators	A) 1.	2.	3.	B) 1.	2.	3.
1. $x_i$	1			1		
2. $x_i-b_i$	0.929***	1		0.993***	1	
3. I	0.851***	0.830***	1	0.906***	0.904***	1

\*\*\* достоверност при P= 0,1 %; significance at P=01, %

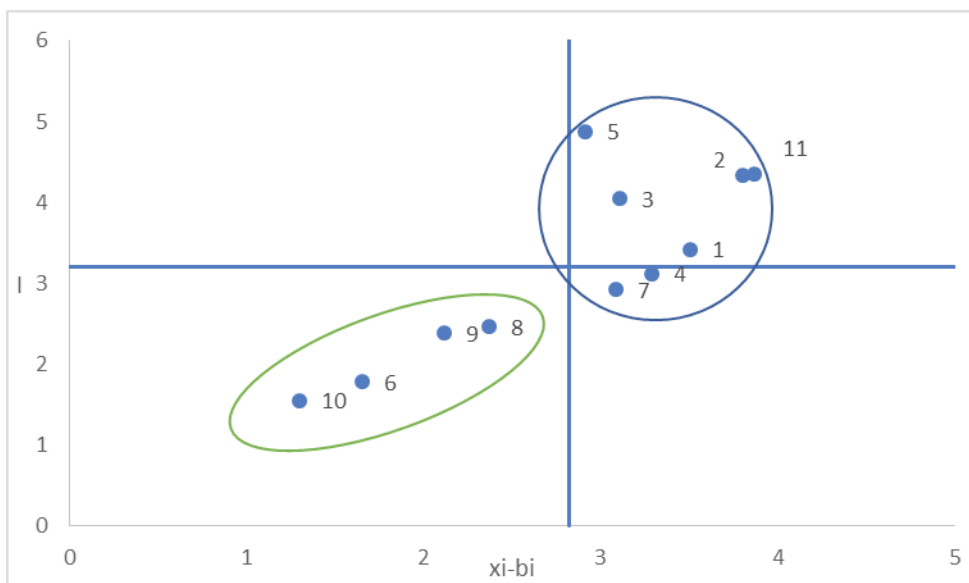


казано и в други наши проучвания (Vulchinkov et al., 2021; Vulchinkov S., et al., 2022), но наличието на някаква връзка между добива и втория индекс в литературата не сме срещали, макар че този индекс, според класификацията на Tsenov et al.

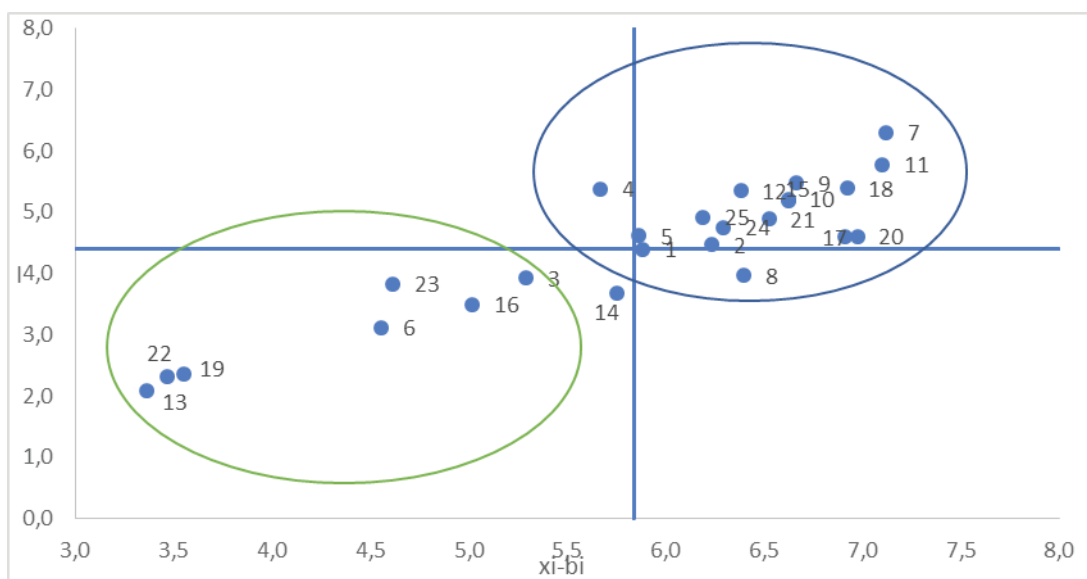
(2022a) принадлежи към групата „добив минус стабилност“, към която е и индекса за обща адаптация. За нас този факт е изненадващ, но създава условия за едновременна (тандем) селекция на високодобивни и стабилни генотипове.



**Фигура 2.** Клъстерен анализ на 25 хибрида по добив на зърно (t/ha) и по индексите за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ) и за стабилност (I)  
**Figure 2.** Cluster analysis of 25 hybrids by grain yield (t/ha) and by indices of general adaptation ( $x_i-b_i$ ) and stability (I)



**Фигура 3.** Биplotно разпределение (biplot) на 11 самоопрашени линии по индексите за обща адаптация ( $x_i-b_i$ ) и за стабилност (I)  
**Figure 3.** Biplot of 11 inbred lines by indices of general adaptation ( $x_i-b_i$ ) and stability (I)



**Фигура 4.** Биplotно разпределение (biplot) на 25 хибрида по индексите за обща адаптация ( $x_i - b_i$ ) и за стабилност (I)

**Figure 4.** Biplot of 25 hybrids by indices of general adaptation ( $x_i - b_i$ ) and stability (I)

Не всички индекси корелират с добива (Tsenov et al., 2022a), а при използването на голям брой индекси с разнопосочни оценки, изчислени с достъпни софтуерни пакети може да се стигне до комплициране на оценките за добив и стабилност на генотиповете (Gubatov & Delibaltova, 2020).

Установената връзка между двата използвани индекса се потвърждава и от клъстерния анализ на резултатите от опитите само с тези два показателя. Във фигури 3 и 4 тези резултати са представени като биplot с гнездови дизайн.

На първата фигура се виждат два основни клъстера, като на първия от тях в долния ляв ъгъл на графиката се виждат същите четири линии с по-слаб добив и стабилност, които са и на фигура 1, а останалите седем са в другия клъстер, като най-високодобивните и стабилни (№ 2 и 11) са в горния десен ъгъл.

Аналогична картина се наблюдава и при хибридите (фиг. 4). Клъстерът със седем хибрида с по-лоши показатели, нискодобивни и нестабилни, е в лявата долна част на графиката, с по-ниски стойности от средните и за двата индекса ( $x_i - b_i$ ) и I. Останалите хибриди са във втория голям клъстер, като само хибрид № 14 „прескача“ извън този клъстер, за разлика от фиг. 2. Въпросните три хибрида (7,11 и 18) от същата

фигура са разположени в горния десен ъгъл на фигура 4. Между резултатите от двата анализа има много добра съгласуваност.

Според Tsenov et al. (2022a) индексът за стабилност (I), макар и не много популярен може да се използва в една група с други индекси или параметри: (Pi/a), (YSi/b), KR/c), (GAI), (R1) – които „безпогрешно“ ни ориентират към сортовете с най-добро съчетание добив и стабилност. Би могло нашият индекс за обща адаптация ( $x_i - b_i$ ), който има близки оценки с индекса (I) за линиите и хибридите да се причисли към тази група, с препоръката да се използва в tandem с други подобни индекси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на извършените анализи на проучените линии и хибриди се правят следните изводи:

1. Двата индекса за обща адаптация ( $x_i - b_i$ ) и за стабилност (I) показват много сходни оценки на стабилността и добива, както при проучените самоопрашени линии, така и при хибридите.
2. Индексите имат достоверна положителна корелация с добива на зърно, както и по меж-

ду си, като могат да се използват в тандем при комплексна оценка на адаптивната способност на проучвани генотипове.

3. Клъстерният анализ и ранжирането, обхващащи добива и използваните индекси, показват много сходни оценки при определяне на адаптивната способност при линиите и хибридите.

4. От проучените линии с най-добра адаптация е B55, а при хибридите – Кн 613.

## ЛИТЕРАТУРА

- Bajpai, P. K., & Prabhakaran, V. T.** (2000). A new procedure of simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. *Indian Journal of genetics & Plant Breeding*, 60(2), 141-146.
- Baker, R. J.** (1986). *Selection indices in plant breeding*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Bose, L. K., Jambhulkar, N. N., Pande, K., & Singh, O. N.** (2014). Use of AMMI and other stability statistics in the simultaneous selection of rice genotypes for yield and stability under direct-seeded conditions. *Chilean journal of agricultural research*, 74(1), 3-9.
- Cerón-Rojas, J. J., & Crossa, J.** (2022). The statistical theory of linear selection indices from phenotypic to genomic selection. *Crop Science*, 62(2), 537-563.
- Céron-Rojas, J. J., & Crossa, J.** (2018). *Linear selection indices in modern plant breeding* (p. 256). Springer Nature. 10.1007/978-3-319-91223-3
- Cheshkova, A. F., Stepochkin, P. I., Aleynikov, A. F., Grebennikova, I. G., & Ponomarenko, V. I.** (2020). A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 24(3), 267-275. (Ru) <https://doi.org/10.18699/vj20.619>
- Dragavtsev, V. A., & Aver'yanova, A. F.** (1983). Mechanism of genotype-environment interaction and homeostasis of quantitative characters in plants [Wheat, genetic parameters]. *Genetics*. Vol. 19, 11: 1806-1810 pp. (Ru).
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A.** (1966). Stability Parameters for Comparing Varieties. 1. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Fan, X. M., Kang, M. S., Chen, H., Zhang, Y., Tan, J., & Xu, C.** (2007). Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agronomy journal*, 99(1), 220-228.
- Farshadfar, E., Mahmudi, N., & Sheibanirad, A.** (2014). Nonparametric methods for interpreting genotype×environment interaction in bread wheat genotypes. *J. Bio. & Env. Sci.* 4, 55-62.
- Fasoula, D. A., Ioannides, I. M., & Fasoula, V.A.** (1993). A criterion for selecting among entries that considers jointly productivity, stability and heritability *Agron. Abstr.*, p.88.
- Fasoula, V. A.** (2013). Prognostic breeding: A new paradigm for crop improvement. *Plant breeding reviews*, 37, 297-347.
- Fasoulas, A., C.** (1993). *Principles of crop breeding*. Thessaloniki. 127 p.
- Finlay K. W., & Wilkinson G. N.** (1963) The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust J Agric Res* 14: 742-754
- Greveniotis, V., Bouloumpasi, E., Zotis, S., Korkovelos, A., & Ipsilandis, C. G.** (2022). Estimations on Trait Stability of Maize Genotypes. *Agriculture*, 11(10), 952.
- Gubatov, T., & Delibaltova, V.** (2020). Evaluation of wheat varieties by the stability of grain yield in multi-environmental trails. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26(2), 384-394.
- Hallauer A. R.** (2011). Evolution of Plant Breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 11: 197-206, 2011
- Hallauer, A. R.** (1988). Modern methods in breeding. Workshop on maize breeding and maize production. Euromaize'88. October 6-8, 1988, Belgrade, Yugoslavia.
- Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Miranda Filho, J. D.** (2010). *Quantitative genetics in maize breeding* (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- Ilker, E., Aykut Tonk, F., Caylak, O., Tosum, M., & Ozmen I.** (2009). Assessment of genotype environment interactions for grain yield in maize hybrids using AMMI and GGE biplot analyses. *Turkish Journal of Field Crops* 14 (2): 123-135.
- Kang, M. S. & Phan, H. M.** (1991). Simultaneous Selection for High Yielding and Stable Crop Genotypes. *Agronomy Journal*, 83:161-165.
- Kang, M. S.** (1991). Modified rank-sum method for selecting high yielding, stable crop genotypes. *Cereal Research Communications*, 19(3), 361-364.
- Kang, M. S., Miller, J. D., & Darrah, L. L.** (1987). A note on relationship between stability variance and ecovariance. *Journal of Heredity*, 78(2), 107-107.
- Kilchevsky, A. V., & Khotyleva, L. V.** (1985). Methods for assessing the adaptive ability and stability of genotypes, the differentiating ability of the environment. *Communication 1. Justification of the method. Genetics* 21 (9): 1481-1490 (Ru).
- Lee, E. A., Good, B., Chakravarty, R., & Kannenberg, L.** (2001). Corn inbred lines CG60 and CG62. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(3), 453-454.
- Lidanski, T. & Noveva** (1990). New indicators for evaluating the variance of quantitative traits. *Genetics and Breeding*, Vol. 23, N 2, (104-107) (Bg).
- Lunezzo de Oliveira, R., Garcia Von Pinho, R., Furtado Ferreira, D., Miranda Pires, L. P., & Costa Melo, W. M.** (2014). Selection index in the study of adaptability and stability in maize. *The scientific world journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/360570>
- Mahmodi, N., Yaghotipoor, A., & Farshadfar, E.** (2011). AMMI stability value and simultaneous estimation of yield and yield stability in bread wheat ("Triticum

- aestivum L.). *Australian Journal of Crop Science*, 5(13), 1837-1844.
- Mendes, F. F., Guimarães, L. J. M., Souza, J. C., Guimarães, P. E. O., Pacheco, C. A. P., Machado, J. R. D. A., ... & Parentoni, S. N.** (2012). Adaptability and stability of maize varieties using mixed model methodology. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 12, 111-117.
- Mitrović, B., Stanisavljević, D., Treskić, S., Stojaković, M., Ivanović, M., Bekavac, G., & Rajković, M.** (2012). Evaluation of experimental maize hybrids tested in multi-location trials using AMMI and GGE biplot analyses. *Turkish Journal of Field Crops*, 17(1), 35-40.
- Perkins, J. M., & Jinks, J. L.** (1968). Environmental and genotype-environmental components of variability. III Multiple lines and crosses. *Heredity*, 23(3), 339-356.
- Pour-Aboughadareh, A., Khalili, M., Poczai, P., & Olivoto, T.** (2022). Stability Indices to Deciphering the Genotype-by-Environment Interaction (GEI) Effect: An Applicable Review for Use in Plant Breeding Programs. *Plants*, 11(3), 414.
- Purchase, J. L., Hatting, H., & Vandeventer, C. S.** (2000). Genotype  $\times$  environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant Soil* 17: 101-107
- Rao, M., Reddy, G. L., Kulkarni, R. S., Reddy, S. L., & Ramesh, S.** (2004). Stability analysis of sunflower hybrids through non-parametric model. *Helia*, 27(41), 59-66.
- Rea, R., De Sousa-Vieira, O., Briceno, R., Diaz, A., George, J.** (2020). Simultaneous selection indices for yield and stability in sugarcane. *Revista de Ciências Agrícolas*. 37(2): 67-77. doi: <https://doi.org/10.22267/rcia.203702.139>
- Shukla, G. K.** (1972). Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity*, Vol. 29, N. 2, pp. 237-245 (Ru).
- Tomov, N.** (1993). Kneja 614 – a late maize hybrid. *Plant Science*, N 1-4 (Bg)
- Tsenov, N., & Atanasova, D.** (2015). Influence of environments on the amount and stability of grain yield in the modern winter wheat cultivars II. Evaluation of each variety. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21(6), 1128-39.
- Tsenov, N., Gubatov, T., & Yanchev, I.** (2022,a). Indices for assessing the adaptation of wheat in the genotype  $\times$  environment interaction. *Rastenievadni nauki* 59(2) 16-34 (Bg).
- Tsenov, N., Gubatov, T., & Yanchev, I.** (2022,b). Ecological and biological explanation of genotype  $\times$  environment interaction of common winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Bulgarian Journal of Crop Science*, 59(4) 28-42.
- Tsenov, N., Gubatov, T., & Yanchev, I.** (2022,c). Comparison of statistical parameters for estimating the yield and stability of winter common wheat. *Agricultural Science & Technology* (1313-8820), 14 (3).
- Uhr, Zl., Dimitrov, E., & Delchev, G.** (2021). Characteristics of perspective lines common winter wheat. 1. Yield and stability. *Rastenievadni nauki*, 58(4) 3-10 (Bg).
- Vulchinkov, S.** (1990). A method for ranking genotypes with a relatively high and stable yield. *Scientific works of AU-Plovdiv*, N 4, 161-165 (Bg.)
- Vulchinkov, S.** (2000). Study on genotype – environment interaction at maize inbred lines and hybrids (*Zea mays* L.). PhD Thesis, NCASc, MRI-Kneja (Bg).
- Vulchinkov, S., Reseleshka, L., Vulchinkova, P., Ilchovska, M., Petrovska, N., & Valkova V.** (2021). Stability assessment of maize hybrids by different methods in relation to their zoning, Perspectives on agricultural science and innovations for sustainable food systems, Jubilee scientific international conference of 75 years of Agricultural University – Plovdiv, pp. 65-76.
- Vulchinkov, S., & Vulchinkova, P.** (2007). General adaptation index in breeding of stress tolerance maize genotypes. In Proc. International Scientific Conference, Stara Zagora (Vol. 1, pp. 324-330) (Bg).
- Vulchinkov, S., Petrovska, N., Vulchinkov, Zh., & Valkova, V.** (2022). Evaluation of the stability of early maize hybrids by parametric and nonparametric methods. Book of abstracts [p. 64] / XXVth EUCARPIA Maize and Sorghum Conference Current Challenges and New Methods for Maize and Sorghum Breeding, May 30 – June 2, 2022. Belgrade – Serbia.
- Ward, J. H.** (1963). Hierarchical grouping to optimized an objective function. *Journal of the American Statistical Association*. 58, 236-244.
- Wricke, G.** (1962). Über eine Methode zur Erfassung der Okologischer Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzüchtg.* 47, 92-96, 1962 (De).
- Zhouchenko, A. A.** (1980). Ecological genetics of culture crops. *Shtinitisa*, 85-88 (Ru).
- Zobel, R. W., Wright, M. J., & Gauch, H. G.** (1988). Statistical Analyses of Yield Trial. *Agron. J.* 80: 388-393.