

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ЛИНИЙ РЕГЕНЕРАНТОВ ЯЧМЕНЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕГО СЕЛЕКЦИОННОГО ПРОЦЕССА

С. Ю. Луговцова, старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, svlug@bk.ru, ORCID ID: 0000-0003-4185-9455;

В. Ю. Ступко, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, stupko@list.ru, ORCID ID: 0000-0002-4430-2719
ФГБНУ «Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства»,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»,
660041, г. Красноярск, пр-кт Свободный, 66; e-mail: secretary@sh.krasn.ru

Параметрические методы оценки фенотипической стабильности сельскохозяйственных культур требуют соблюдения нормальности распределения данных и сбалансированного дизайна эксперимента, что редко достижимо в условиях текущей селекционной работы. Актуально это и для технологии создания *in vitro* регенерантов с устойчивостью к эдафическим стрессовым факторам, когда объем семенного материала ограничен. Целью исследования являлась сравнительная оценка стабильности регенерантов ярового ячменя и их донорных генотипов (сорта Ача, Красноярский 80, линии Н-42-1060, Р-71-2431, Р-7-1854, С-7-2623) на основании данных полевых испытаний 2011–2014 гг. при неполном совпадении наборов исследуемых генотипов от года к году. В работе задействованы индексы, позволяющие проводить оценку в условиях неполного массива данных «генотип × среда» (индекс превосходства P_i , непараметрические индексы $S^{(1)}$, $S^{(3)}$, $NP^{(2)}$). Ранжирование образцов на основании индексов стабильности показало, что половина регенерантов превзошли свои донорные генотипы по фенотипической стабильности ($S^{(1)}$) (НР.1-Ача, НР.Р-71, КР.1-Р-71, СР.1-Р-71, КР.2-Р-7, НР.1-С-7, НР.2-С-7), четыре из них – по индексу превосходства P_i ; два (КР.1-Р-71, КР.1-Р-7) – по сбалансированности продуктивности / стабильности ($NP^{(2)}$, $S^{(3)}$). При этом большинство регенерантов имело массу 1000 зерен на уровне донорных генотипов. Условия культивирования каллусных тканей *in vitro* (низкий pH, NaCl 0,42 %, отсутствие стрессора) не влияли на стабильность формирующихся линий регенерантов. Таким образом, технология отбора соматоклональных вариантов в каллусной культуре позволяет получать линии, зачастую не отличающиеся по массе 1000 зерен от донорного генотипа и превосходящие его по параметрам стабильности.

Ключевые слова: *Hordeum sativum* L., непараметрические индексы стабильности, линии регенерантов, каллусная культура, несбалансированный дизайн эксперимента.

Для цитирования: Луговцова С. Ю., Ступко В. Ю. Оценка стабильности линий регенерантов ячменя в рамках текущего селекционного процесса // Зерновое хозяйство. 2022. Т. 14, № 5. С. 26–32. DOI: 10.31367/2079-8725-2022-82-5-26-32.



ESTIMATION OF THE STABILITY OF BARLEY REGENERATED LINES WITHIN THE CURRENT BREEDING PROCESS

S. Yu. Lugovtsova, senior researcher of the laboratory for physiology and biotechnology, svlug@bk.ru, ORCID ID: 0000-0003-4185-9455;

V. Yu. Stupko, Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for physiology and biotechnology, stupko@list.ru, ORCID ID: 0000-0002-4430-2719
Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Federal Research Center 'Krasnoyarsk Science Center' SB RAS,
660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 66; e-mail: secretary@sh.krasn.ru

Parametric methods for estimating the phenotypic stability of «Agricultural crops require compliance with the normal distribution of data and a balanced design of the experiment, which is rarely achievable under the conditions of current breeding work. This is also relevant for the technology of developing *in vitro* regenerants with resistance to edaphic stress factors, when the volume of seed material is limited. The purpose of the current study was a comparative estimation of the stability of spring barley regenerants and their donor genotypes (the varieties 'Acha', 'Krasnoyarsky 80', lines 'H-42-1060', 'R-71-2431', 'R-7-1854', 'S-7-2623') based on field trials of 2011–2014 with incomplete matching of sets of studied genotypes from year to year. The work involved indices that allow estimating under the conditions of an incomplete data "genotype × environment" (the index of superiority P_i , nonparametric indices $S^{(1)}$, $S^{(3)}$, $NP^{(2)}$). Ranking of samples based on stability indices has shown that half of the regenerants surpassed their donor genotypes in terms of phenotypic stability ($S^{(1)}$) (HP.1-Acha, HP-P-71, KP.1-P-71, CP.1-P-71, KP.2-P-7, HP.1-C-7, HP.2-C-7), four of them according to the P_i superiority index; two of them (KP.1-P-71, KP.1-P-7) according to the balance of productivity / stability ($NP^{(2)}$, $S^{(3)}$). At the same time, most of the regenerants had 1000-grain weight at the level of donor genotypes. Conditions for cultivating callus tissues *in vitro* (low pH, NaCl 0.42 %, no stressor) did not affect the stability of the emerging lines of regenerants. Thus, the technology of selection of somaclonal variants in callus culture makes it possible to obtain lines that often do not differ in 1000-grain weight from the donor genotype and surpass it in stability parameters.

Keywords: *Hordeum sativum* L., nonparametric stability indices, lines of regenerants, callus culture, unbalanced experimental design.

Введение. Использование в селекционной работе оценки стабильности генотипов способствует успешному встраиванию сорта в «экологическую нишу» (Кильчевский, 2005). На фоне

увеличения технических возможностей обработки данных методы, ассоциированные с построением регрессионных моделей реакции генотипа на условия среды, получили свое развитие (Pour-Aboughadareh et al., 2022). Данный подход в основе своей имеет требование к сбалансированности эксперимента – наличия данных по всем генотипам во всех средах, в то время как в практической селекции такой дизайн эксперимента встречается нечасто. Это актуально и для получаемых *in vitro* регенерантов зерновых культур из-за малого количества семенного материала. Невозможность отбора в условиях культуры тканей по параметру высокой продуктивности (Кильчевский, 2005) не исключает, однако, появления образцов, сочетающих в себе урожайность, стрессоустойчивость и большую стабильность в сравнении с донорным генотипом.

Для оценки стабильности генотипов на базе неполных массивов данных чаще применяют непараметрические методы оценки: $S^{(1, 2, 3, 6)}$; непараметрическую статистику К. Теннарасу ($NP^{(1-4)}$); а также индекс превосходства P_r , который разрабатывался авторами именно для таких случаев. Неоспоримыми достоинствами непараметрических индексов являются: отсутствие требования о нормальности распределения и гомоскедастичности; нечувствительность к добавлению или изъятию одного либо нескольких генотипов из тестируемой группы. Расчет большого числа показателей значительно облегчился в последние годы, в особенности с началом

активного использования среды разработки R в работе с данными полевых экспериментов, для которой и создано большинство пакетов, включающих в себя индексы стабильности (Чешкова и др., 2020; Pour-Aboughadareh et al., 2022). Новейшим в этом ряду является «Metan», включающий в себя почти все известные на сегодня параметрические и непараметрические методики оценки стабильности (Olivoto and Lúcio, 2020). Все это позволяет по-новому оценить данные предшествующих лет.

Целью работы являлась сравнительная оценка стабильности линий регенерантов ярового ячменя и их донорных генотипов на основании данных полевых испытаний 2011–2014 гг. при неполном совпадении наборов исследуемых генотипов от года к году.

Материалы и методы исследований.

Объектами исследования служили донорные сорта, перспективные селекционные линии ярового ячменя и линии регенерантов, полученные из каллусной культуры этих образцов (табл. 1). Эксплантами служили незрелые зародыши. Индукцию каллусогенеза проводили на среде Мурасиге–Скуга (МС) с добавлением 3 мг/л 2,4-Д и 2 мг/л ИУК. Со среды индукции каллусы пассировали для пролиферации на среды, содержащие 1,5 мг/л 2,4-Д: оптимальную (нет стресса) и имитирующие стрессовые условия: закисление (pH 4,0) или засоление (NaCl – 0,42 %) почвы (табл. 1). Образцы без признаков некроза пересаживали на среду регенерации МС с добавлением 0,5 мг/л ИУК и 1 мг/л кинетина (Ступко и др., 2014).

Таблица 1. Происхождение и направление отбора линий-регенерантов ярового ячменя
Table 1. Origin and direction of selection of spring barley regenerated lines

Регенерант	Донорный генотип	Вид стрессора при отборе клеточной линии	Период полевых испытаний, гг.
НР.1-Красноярский 80	Красноярский 80	нет стрессора	2012–2014
НР.1-Ача	Ача	нет стрессора	2011–2013
КР.1-Ача		закисление	2011–2014
СР.Ача		засоление	2011–2014
СР.Н-42-1060	Н-42-1060	засоление	2011–2013
НР-Р-71	Р-71-2491	нет стрессора	2012–2014
КР.1-Р-71		закисление	2011–2014
СР.1-Р-71		засоление	2011–2014
НР.1-Р-7		нет стрессора	2011–2013
КР.1-Р-7	Р-7-1854	закисление	2011–2014
КР.2-Р-7			2011–2014
КР.3-Р-7			2011–2014
НР.1-С-7	С-7-2623	нет стрессора	2012–2014
НР.2-С-7			2011–2013

Примечание. Донорные генотипы высевались в 2011–2014 годах.

Образцы культивировали на опытных полях, расположенных в центральной части Красноярской лесостепи (ОПХ «Минино»), согласно методике ГСИ (1989) в различающихся по увлажнению условиях (табл. 2). За июньской засухой 2011 г., ускорившей закладку колоса, последовал период обильных осадков, что также способствовало формированию и наливу

зерна. Условия 2012 г. отличало малое количество осадков и высокие температуры. На фоне высокого ГТК 2013 г. отмечались достаточно сухой сентябрь и температуры периода вегетации, близкие к среднепогодным. 2014 г. отмечен максимальным за исследуемые годы превышением количества осадков к среднепогодному.

Сроки высева 20–25 мая. Площадь опытных делянок 1 м² ($n = 3$). Норма высева – 500 всхожих зерен/м². Предшественник – чистый пар.

Набор генотипов не совпадал от года к году (табл. 1).

Таблица 2. Метеоусловия периода вегетации в 2011–2014 гг.
Table 2. Weather conditions of the vegetation period in 2011–2014

Месяц	Среднесуточная температура, °С							
	Среднемесячная				% к среднемноголетней			
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014
Май	10,7	10,3	8,1	7,3	107	103	81	73
Июнь	19,6	20,2	16,0	16,5	130	135	107	110
Июль	16,9	20,1	18,2	19,7	89	106	96	104
Август	15,5	14,8	16,6	16,5	97	93	104	103
Сентябрь	8,5	11,2		8,0	106	140		100
	Количество осадков, мм							
	За месяц				% к среднемноголетнему			
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014
Май	44,2	19,6	55,9	56,0	153	68	193	193
Июнь	36,4	17,7	57,8	73,0	84	41	134	170
Июль	123,9	61,4	112,3	103,0	188	93	170	156
Август	95,6	58,2	133,1	100,0	157	95	218	164
Сентябрь	23,1	27,7	31,1	18,0	68	81	91	53
ГТК	1,64	0,83	2,26	2,11				

Для расчета индексов стабильности использовали пакет программ «Metan» (Olivoto and Lúcio, 2020). Параметрический индекс превосходства P_i определяет наиболее стабильный генотип как образец, наименее отклоняющийся от максимальной урожайности в каждой из сред (лет) (1):

$$P_i = \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \text{Max}_j)^2 / (2N), \quad (1)$$

где N – количество сред, x_{ij} – значение параметра для i -го генотипа в j -й среде, Max_j – максимальное значение параметра в j -й среде.

Индекс $S^{(1)}$, предложенный М. Хьюэном и Р. Нассаром (Pour-Aboughadareh et al., 2022), по данным ряда исследователей коррелирует с квадратичным отклонением от линии регрессии С. Эберхарта и У. Расселла (Чешкова и др., 2020a) и характеризует, соответственно, предсказуемость реакции генотипа на условия (2):

$$S^{(1)} = \frac{2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=j+1}^N |r_{ij} - r_{if}|}{N(N-1)}, \quad (2)$$

где r_{ij} – ранг i -го генотипа в j -й среде.

Параметр $S^{(3)}$ направлен на выявление генотипа с оптимальным соотношением этих двух параметров и рассчитывается из соотношения отклонения ранга i -го генотипа (r_{ij}) от потенциального максимального ранга ($\bar{r}_i$) (3,4):

$$S^{(3)} = \sum_{j=1}^N \frac{|r_{ij} - \bar{r}_i|}{\bar{r}_i}, \quad (3)$$

$$\bar{r}_i = \sum_{j=1}^N \frac{r_{ij}}{N}. \quad (4)$$

Коррекция данных может быть проведена по формуле (5):

$$x_{ij}^* = x_{ij} - (\bar{x}_i - \bar{x}.), \quad (5)$$

где $\bar{x}_i$ – среднее значение параметра для i -го генотипа, $\bar{x}.$ – среднее значение параметра в эксперименте.

В свою очередь индекс $NP^{(2)}$, который К. Теннарасу позиционировал так же, как критерий, позволяющий отбирать генотипы с высокой урожайностью и стабильностью, имеет в своей основе разницу между рангом (r_{ij}) и медианным значением ранга (M_{d_i}) (6). При этом учитывается и медианное значение ($M_{d_i}^*$) скорректированных данных исследуемого параметра продуктивности (7):

$$N^{(2)} = \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N \frac{|r_{ij} - M_{d_i}|}{M_{d_i}^*} \right], \quad (6)$$

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}_i). \quad (7)$$

Совмещение в одном индексе скорректированных и исходных данных снижает зависимость от значений урожайности, по мнению автора методики (Pour-Aboughadareh et al., 2022). Использование обоих индексов применимо для отбора линий, сбалансированных по стабильности и урожайности, соотношению этих двух характеристик.

Все образцы были ранжированы от наиболее стабильного к наименее стабильному исходя из расчетных значений индексов. Ранг 1, соответственно, присвоен наиболее стабильному образцу, ранг 20 – наименее. На рисунке 1 и 2 представлены данные ранжирования.

Статистический анализ данных по урожайности исследуемых генотипов проводили с использованием статистического пакета R4.0.4 в среде разработки RStudio 1.4.1103 (2009–2021 RStudio, PBC). Соответствие распределения данных нормальному определяли тестом Шапиро–Вилкса. Достоверность различий между генотипами в отдельные годы

оценивали в рамках однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA). Проверляли достоверность различий между донорным генотипом и регенерантом. Равенство дисперсий определяли тестом Левина.

Результаты и их обсуждение. Использование технологии культивирования каллусных культур на селективных средах предполагает создание новых форм, устойчивых к стрессовым эдафическим факторам за счет высокой частоты соматических вариаций, которая в три раза превышает таковую спонтанных мутаций *in vivo* (Егорова и Старцева, 2013). В силу особенностей технологии регенеранты испыты-

ваются в разные годы по мере накопления семенного материала. В настоящей работе в качестве нормирующих генотипов задействованы донорные сорта и линии, которые высевались во все годы экспериментов. Параметры стабильности рассчитывали на базе данных «масса 1000 зерен» в связи с малой площадью опытных делянок.

Расчет индекса превосходства для условий культивирования дал следующие результаты. Для 2011 и 2013 гг. индексы составили соответственно 0,93 и 2,87. Максимальная масса зерна зафиксирована в 2013 г. ($M_{1000} = 44,53 \pm 0,36$ г) (табл. 3).

Таблица 3. Масса 1000 зерен регенерантов ячменя и их донорных генотипов в условиях ОПХ «Минино» в 2011–2014 гг (г, среднее $\pm$ ст.ош.)
Table 3. 1000-grain weight of barley regenerants and their donor genotypes under the conditions of the farm 'Minino' in 2011–2014 (g, mean $\pm$ stan.m.)

Генотип	2011	2012	2013	2014	Среднее
Красноярский 80	45,40 $\pm$ 0,63	40,92 $\pm$ 0,61	46,77 $\pm$ 0,19	41,93 $\pm$ 0,77	43,76 $\pm$ 0,77
НР.1-Красноярский 80	–	39,06 $\pm$ 0,94	43,48 $\pm$ 0,46*	40,35 $\pm$ 1,36	40,96 $\pm$ 0,82
Ача	42,92 $\pm$ 0,16	41,36 $\pm$ 0,14	46,69 $\pm$ 0,53	40,54 $\pm$ 0,31	42,88 $\pm$ 0,73
НР.1-Ача	43,96 $\pm$ 0,80	40,37 $\pm$ 0,39	48,28 $\pm$ 0,09*	–	44,20 $\pm$ 1,17
КР.1-Ача	42,94 $\pm$ 0,22	41,13 $\pm$ 2,13	45,60 $\pm$ 0,33	37,78 $\pm$ 1,12	41,86 $\pm$ 1,00
СР.Ача	42,57 $\pm$ 1,24	40,28 $\pm$ 0,25	48,36 $\pm$ 0,57*	41,34 $\pm$ 0,89	43,14 $\pm$ 1,00
Н-42-1060	46,86 $\pm$ 0,65	45,59 $\pm$ 0,84	50,64 $\pm$ 3,22	–	47,70 $\pm$ 1,24
СР.Н-42-1060	42,93 $\pm$ 0,93*	42,13 $\pm$ 1,15	43,33 $\pm$ 0,51*	–	42,80 $\pm$ 0,48
Р-71-2491	43,58 $\pm$ 1,48	38,83 $\pm$ 0,96	41,87 $\pm$ 0,55	39,25 $\pm$ 0,84	40,88 $\pm$ 0,73
НР.Р-71	–	41,93 $\pm$ 0,87	42,15 $\pm$ 0,49	39,23 $\pm$ 0,37	41,10 $\pm$ 0,56
КР.1-Р-71	40,85 $\pm$ 0,57	38,71 $\pm$ 1,79	40,85 $\pm$ 0,17	37,11 $\pm$ 0,50	39,38 $\pm$ 0,63
СР.1-Р-71	42,31 $\pm$ 0,52	40,35 $\pm$ 0,53	41,75 $\pm$ 0,33	38,32 $\pm$ 0,74	40,68 $\pm$ 0,52
Р-7-1854	42,30 $\pm$ 0,75	38,69 $\pm$ 0,55	44,07 $\pm$ 0,73	38,19 $\pm$ 0,19	40,81 $\pm$ 0,78
НР.1-Р-7	41,89 $\pm$ 1,11	42,37 $\pm$ 0,72*	44,31 $\pm$ 0,26	–	42,86 $\pm$ 0,54
КР.1-Р-7	41,90 $\pm$ 0,34	40,31 $\pm$ 0,23	43,36 $\pm$ 0,69	37,29 $\pm$ 1,80	40,72 $\pm$ 0,80
КР.2-Р-7	41,57 $\pm$ 0,18	41,27 $\pm$ 1,91	43,11 $\pm$ 0,40	37,44 $\pm$ 0,55	40,85 $\pm$ 0,76
КР.3-Р-7	40,12 $\pm$ 0,72	41,27 $\pm$ 1,03	44,52 $\pm$ 0,66	36,64 $\pm$ 1,10	40,64 $\pm$ 0,93
С-7-2623	40,79 $\pm$ 0,04	40,47 $\pm$ 1,08	43,23 $\pm$ 0,28	35,49 $\pm$ 1,96	39,99 $\pm$ 0,97
НР.1-С-7	–	42,44 $\pm$ 2,54	43,91 $\pm$ 0,44	37,75 $\pm$ 0,67	41,36 $\pm$ 1,21
НР.2-С-7	40,99 $\pm$ 0,34	41,39 $\pm$ 0,43	44,23 $\pm$ 0,46	–	42,20 $\pm$ 0,55
Среднее	42,58 $\pm$ 0,28	40,94 $\pm$ 0,30	44,53 $\pm$ 0,36	38,58 $\pm$ 0,34	–

Примечание. * – статистически значимое отличие регенеранта от донорного генотипа при $p < 0,05$.

В свою очередь 2012 и 2014 гг. отличались неблагоприятными условиями: индексы –0,71 и –3,08 соответственно. Условия 2012 г. (малое количество осадков и высокие температуры) (табл. 2) негативно сказались на итоговой урожайности (табл. 3). В 2014 г., отмеченном максимальным за исследуемые годы превышением количества осадков к среднемуголетнему (табл. 2), сформировалось зерно с минимальной массой ($M_{1000} = 38,58 \pm 0,34$ г). В работе (Cheshkova et al., 2020) показано, что P_i сильно коррелирует с продуктивностью и, по мнению авторов, может применяться в программах селекции на урожайность.

В 2013 г. два регенеранта от сорта Ача превысили свой донорный генотип по массе зерна (табл. 3). Образец, полученный на среде с высоким содержанием соли в каллусной культуре селекционной линии Н-42-1060, уступил донорному генотипу в благоприятных условиях 2011 и 2013 гг., так же как и регенерант НР.1-

(Красноярский 80) в 2013 году. При этом в неблагоприятных условиях 2012 г. регенеранты от линии Р-7-1854 сформировали более крупное зерно, чем донорный генотип. Аналогичные результаты получены нами при испытаниях регенерантов пшеницы на оптимальных почвенных фонах, где в условиях засухи они показывали результаты выше, чем донорные генотипы (Ступко и др., 2014). В этой же работе в ходе исследований на стрессовых почвенных фонах нами была показана высокая эффективность технологии отбора солеустойчивых форм *in vitro*.

Анализ стабильности исследуемого параметра структуры урожая, выраженной в индексах P_i и $S^{(n)}$, показывает, что упомянутые выше регенеранты НР.1-Ача и СР-Ача имели большую фенотипическую стабильность, чем донорный генотип, и близкое к нему значение P_i (табл. 4). Их ранг выше и, соответственно, на графике (рис. 1) отмечающие их круги располагаются ближе к точке пересечения осей.

Таблица 4. Коэффициенты стабильности и ранги регенерантов ячменя и их донорных генотипов
Table 4. Stability coefficients and ranks of barley regenerants and their donor genotypes

Генотип	P_i	Ранг	$S^{(1)}$	Ранг	$S^{(3)}$	Ранг	$NP^{(2)}$	Ранг
Красноярский 80	4,86	2	0,17	1	2,00	5	0,40	13
НР.1-Красноярский 80	16,06	15	1,00	8	10,73	18	0,56	16
Ача	6,37	3	1,33	12	0,96	2	0,17	4
НР.1.Ача	6,86	5	0,33	2,5	4,21	7	0,28	9
КР.1.Ача	9,73	6	2,33	18	3,04	6	0,26	7
СР.Ача	6,51	4	1,17	10	8,83	13	0,29	10
Н-42-1060	0,00	1	0,67	5	0,70	1	0,00	1
СР.Н-42-1060	13,47	9	3,17	20	7,00	10	0,33	11
Р-71-2491	17,58	18	2,00	14,5	12,23	19	1,01	19
НР-Р-71	15,47	11	1,33	12	10,00	16	1,13	20
КР.1-Р-71	25,32	20	0,67	5	1,22	3	0,43	14
СР.1-Р-71	17,54	17	0,67	5	4,85	8	0,70	18
Р-7-1854	15,70	13	1,33	12	7,71	12	0,23	5
НР.1-Р-7	12,53	8	2,17	16,5	7,04	11	0,27	8
КР.1-Р-7	15,88	14	1,00	8	1,40	4	0,16	3
КР.2-Р-7	15,46	10	0,33	2,5	6,14	9	0,24	6
КР.3-Р-7	16,20	16	2,50	19	18,94	20	0,60	17
С-7-2623	19,95	19	2,17	16,5	9,11	14	0,05	2
НР.1-С-7	12,13	7	1,00	8	10,24	17	0,39	12
НР.2-С-7	15,55	12	2,00	14,5	9,68	15	0,49	15

Регенерант НР.1-Р-7 был чувствителен к изменению условий (ранг по $S^{(1)}$ ниже, чем у линии Р-7-1854 (табл. 4), которая расположена на графике (рис. 1) дальше, ближе к пересечению осей, левее), но поддерживал массу 1000 зерен на достаточно высоком уровне (ранг P_i выше, чем у донора). Более стабильными ока-

зались оба регенеранта от линии С-7-2623, так же как и нейтральный регенерант от линии Р-71-2491 (НР-Р-71). Два регенеранта, полученные на селективных средах (КР.1-Р-71, СР.1-Р-71), при близком к донору P_i отличались от него большей фенотипической стабильностью.

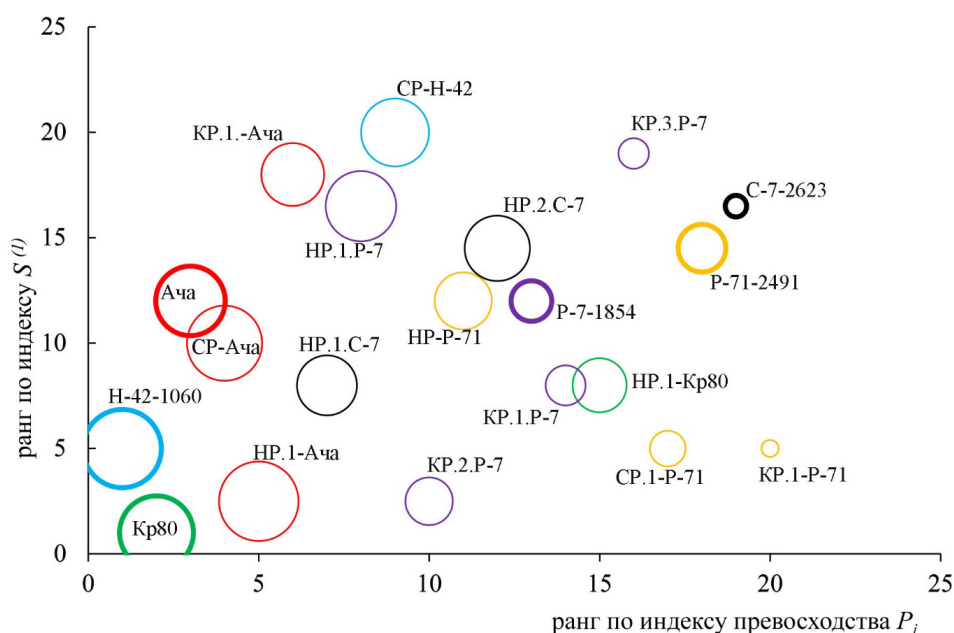


Рис. 1. Ранжирование регенерантов ячменя по значениям индексов превосходства P_i и стабильности $S^{(1)}$ массы 1000 зерен. Чем больше диаметр, тем больше масса 1000 зерен
Fig. 1. Ranking of barley regenerants according to the values of the indexes of superiority P_i and stability $S^{(1)}$ of 1000-grain weight. The larger the diameter, the greater 1000-grain weight

В практической селекции получение образцов, сочетающих в себе высокую урожайность и фенотипическую стабильность, является предпочтительным. Параметр $S^{(3)}$ разработан

для этих целей. Данный параметр сильно зависит от урожайности в случае, если рассчитывается на базе нескорректированных данных, и коррелирует с индексом $S^{(1)}$, если рассчи-

тывается на основе скорректированных данных (5).

Так, линия Н-42-1060 с высокой массой 1000 зерен здесь имеет максимальный ранг по обоим индексам (табл. 4) и располагается на графике максимально близко к пересечению осей (рис. 2). Близко к ней располагаются сорт Ача и регенерант КР.1-Р-7. При невысокой массе зерна последний занимает место в рейтинге фенотипической стабильности выше половины из исследованных образцов ($S^{(1)} = 8$),

что в совокупности делает его сбалансированным по этим двум параметрам. Регенеранты от линии Р-71-2491, имея высокий ранг по индексу $S^{(3)}$, однако находятся внизу рангов по индексу $NP^{(2)}$. Это связано с большим изменением рангов при коррекции данных (x_{ij}^3). При том, что колебания их массы 1000 зерен были минимальны, что видно из параметра «ранг по $S^{(1)}$ » (рис. 1), низкая урожайность за все годы снизила ранг по $NP^{(2)}$.

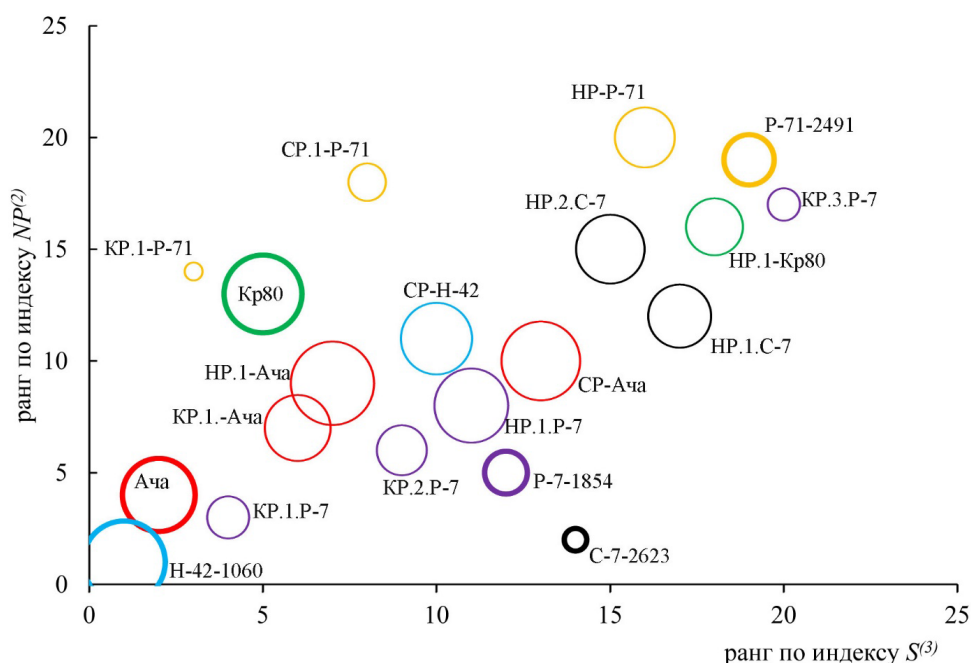


Рис. 2. Ранжирование регенерантов ячменя по значениям индексов стабильности $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$ массы 1000 зерен. Чем больше диаметр, тем больше масса 1000 зерен

Fig. 2. Ranking of barley regenerants according to the values of the stability indices $NP^{(2)}$ and $S^{(3)}$ of 1000-grain weight. The larger the diameter, the greater 1000-grain weight

В работах, посвященных получению регенерантов на селективных средах, упоминается асимметрия по параметрам урожайности в сторону «ухудшения» в случае использования в качестве доноров высокопродуктивных сортов (Рожанская и Горшкова, 2019). Регенеранты от сорта Красноярский 80 и генотипа с максимальной массой 1000 зерен, Н-42-1060 в рейтинге по индексу превосходства P_i были ниже донорных генотипов, а при определении индексов баланса стабильность/урожайность на графике располагались намного правее доноров. В свою очередь регенеранты от трех оставшихся селекционных линий демонстрировали при близкой к средней массе зерна широкий спектр индексов стабильности, как и регенеранты от сорта Ача. В том числе и располагались выше, ближе к пересечению осей на графиках, в рейтинге по некоторым индексам стабильности.

Выводы

1. Половина из исследованных регенерантов ячменя отличалась от своих донорных генотипов в сторону большей стабильности ($S^{(1)}$) (НР.1-Ача, НР-Р-71, КР.1-Р-71, СР.1-Р-71,

КР.2-Р-7, НР.1-С-7, НР.2-С-7). Четыре из них имели также и высокий ранг по индексу превосходства (P_i) (НР.1-Ача, КР.2-Р-7, НР.1-С-7, НР.2-С-7).

2. Два регенеранта (КР.1-Р-71, КР.1-Р-7) превзошли донорные линии по сбалансированности высокая масса 1000 зерен / стабильность ($NP^{(2)}$, $S^{(3)}$). Большинство регенерантов имели массу 1000 зерен на уровне донорных генотипов.

3. Условия регенерации растений *in vitro* (рН, NaCl) не коррелировали с уровнем стабильности получаемых регенерантов. Линии, полученные в условиях индуцированного стресса, не имели значимых отличий в отношении стабильности массы 1000 зерен от таковых, полученных на оптимальной, не селективной, питательной среде.

4. Технология получения регенерантов *in vitro* в условиях каллусной культуры позволяет получать линии, превосходящие по стабильности донорный генотип. При этом, масса 1000 зерен и, вероятно, урожайность, как сильно коррелирующей с этим параметром показатель, сохраняется на уровне донорного генотипа.

Библиографические ссылки

1. Егорова Н. А., Ставцева И. В. Биотехнологические приемы получения форм шалфея, устойчивых к осмотическому стрессу *in vitro* // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2013. № 8(27). С. 93–100.
2. Кильчевский А. В. Генетико-экологические основы селекции растений // Информационный вестник ВОГиС. 2005. № 4(9). С. 518–526.
3. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1989. 195 с.
4. Рожанская О. А., Горшкова Е. М. Культура *in vitro* как источник биоразнообразия для селекции сои // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019. № 4(49). С. 24–31. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-4-3.
5. Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю., Зобова Н. В. Полевая оценка результативности создания *in vitro* стрессоустойчивых форм ячменя и пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 6. С. 11–14.
6. Чешкова А. Ф., Гребенникова И. Г., Алейников А. Ф., Чанышев Д. И. Реализация методов оценки стабильности сортов сельскохозяйственных культур в пакете функций *agrostab* программной среды R // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34, № 7. С. 91–96. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10716.
7. Cheshkova A. F., Stepochkin P. I., Aleynikov A. F., Grebennikova I. G., Ponomarenko V. I. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. Vol. 24, № 3. P. 267–275. DOI: 10.18699/VJ20.619.
8. Olivoto T., Lúcio A. D. Metan: An R package for multi-environment trial analysis // Methods in Ecology and Evolution. 2020. Vol. 11(6). P. 783–789. DOI: 10.1111/2041-210X.13384.
9. Pour-Aboughadareh A., Khalili M., Pocza P., Olivoto T. Stability Indices to Deciphering the Genotype-by-Environment Interaction (GEI) Effect: An Applicable Review for Use in Plant Breeding Programs // Plants. 2022. Vol. 11(3). P. 414–437. DOI: 10.3390/plants11030414.

References

1. Egorova N. A., Stavtseva I. V. Biotechnologicheskie priemy polucheniya form shalfeya, ustoichivyykh k osmoticheskomu stressu *in vitro* [Biotechnological methods for obtaining salvia forms resistant to osmotic stress *in vitro*] // Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana. 2013. № 8(27). S. 93–100.
2. Kil'chevskii A. V. Genetiko-ekologicheskie osnovy selektsii rastenii [Genetic and ecological basis of plant breeding] // Informatsionnyi vestnik VOGiS. 2005. № 4(9). S. 518–526.
3. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Methodology of the State Variety Testing of Agricultural crops]. M.: Kolos, 1989. 195 s.
4. Rozhanskaya O. A., Gorshkova E. M. Kul'tura *in vitro* kak istochnik bioraznoobraziya dlya selektsii soi [Culture *in vitro* as a source of biodiversity for soybean breeding] // Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki. 2019. № 4(49). S. 24–31. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-4-3.
5. Stupko V. Yu., Lugovtsova S. Yu., Zobova N. V. Polevaya otsenka rezul'tativnosti sozdaniya *in vitro* stressoustoichivyykh form yachmenya i pshenitsy [Field evaluation of the effectiveness of developing *in vitro* stress-resistant forms of barley and wheat] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2014. № 6. S. 11–14.
6. Cheshkova A. F., Grebennikova I. G., Aleynikov A. F., Chanyshchev D. I. Realizatsiya metodov otsenki stabil'nosti sortov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v pakete funktsii *agrostab* programmnoi sredy R [Implementation of methods for estimating stability of crop varieties in the *agrostab* function package of the R software environment] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2020. T. 34, № 7. S. 91–96. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10716.
7. Cheshkova A. F., Stepochkin P. I., Aleynikov A. F., Grebennikova I. G., Ponomarenko V. I. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. Vol. 24, № 3. P. 267–275. DOI: 10.18699/VJ20.619.
8. Olivoto T., Lúcio A. D. Metan: An R package for multi-environment trial analysis // Methods in Ecology and Evolution. 2020. Vol. 11(6). P. 783–789. DOI: 10.1111/2041-210X.13384.
9. Pour-Aboughadareh A., Khalili M., Pocza P., Olivoto T. Stability Indices to Deciphering the Genotype-by-Environment Interaction (GEI) Effect: An Applicable Review for Use in Plant Breeding Programs // Plants. 2022. Vol. 11(3). P. 414–437. DOI: 10.3390/plants11030414.

Поступила: 22.08.22; доработана после рецензирования: 10.10.22; принята к публикации: 10.10.22.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Ступко В. Ю. – концептуализация исследования; Луговцова С. Ю. – подготовка опыта; Луговцова С. Ю. – выполнение полевых опытов сбор данных; Ступко В. Ю. – анализ данных и их интерпретация; Ступко В. Ю. – подготовка рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.