

Оценка стабильности регенерантных линий овса, сформировавшихся в условиях каллусной культуры *in vitro**

В. Ю. СТУПКО, С. Ю. ЛУГОВЦОВА

Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», просп. Свободный, 66, Красноярск, 660041, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью сравнительной оценки продуктивности и стабильности регенерантных линий ярового овса и их донорных сортов: пленчатых (Тубинский st. – 3 линии, Саян – 3, Казыр – 1) и голозерных (Тюменский голозерный – 3, Голец – 2). Полевые испытания осуществляли в лесостепной зоне Красноярского края на чернозёме выщелоченном. Критерии оценки стабильности: индекс превосходства P_i , определяющий степень отклонения образца от максимальной урожайности в каждой из сред (лет); индекс $S^{(1)}$, характеризующий предсказуемость реакции генотипа на условия; индекс $S^{(3)}$, направленный на выявление высокопродуктивных и высокостабильных генотипов; индекс $NP^{(2)}$, предназначенный для отбора генотипов с оптимальным соотношением продуктивности и стабильности. Большинство регенерантов формировали урожайность и массу 1000 зерен близкие к донорным сортам. Исключение составили три линии сорта Тубинский, превзошедшие его по урожайности в среднем за три года: CP6-Туб. – на 1,78 т/га, CP11-Туб. – на 2,45 т/га, CP15-Туб. – на 2,95 т/га. При этом у линии CP6-Туб. масса 1000 зерен была ниже, чем у исходного сорта, на 1,9 г, ЗР4-Голец – на 1,4 г. Линия ЗР15-Казыр уступила по этому параметру донорному сорту в 2017 г. на 1,4 г. У 9 из 12 исследованных линий ранг по индексам стабильности урожайности P_i и $S^{(1)}$ был в среднем на 5,7 выше, чем у исходных донорных сортов. По массе 1000 зерен аналогичный результат отмечен у 4 (P_i выше на 2,25 ранга) и 8 ($S^{(1)}$ – на 6,6 рангов) регенерантов. По индексу $S^{(3)}$ 6 линий из 12 превосходили доноров в среднем на 7 рангов, по массе 1000 зерен – 9 линий на 5,3 ранга. Ранг по индексу $NP^{(2)}$ выше, чем у доноров, на 5,5 по урожайности отмечен у 4 линий, на 6,2 по массе 1000 зерен у 10 линий.

Ключевые слова: овес (*Avena sativa*), каллусная культура, регенеранты, фенотипическая стабильность, селекция овса, продуктивность.

Сведения об авторах: В. Ю. Ступко, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: stupko@list.ru); С. Ю. Луговцова, старший научный сотрудник.

Для цитирования: Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю. Оценка стабильности регенерантных линий овса, сформировавшихся в условиях каллусной культуры *in vitro* // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. №3. С. 28–33. doi: 10.53859/02352451_2023_37_3_28.

*работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания №121052500127-8 (FWES-2021-0037).

Evaluation of the stability of oat regenerant lines formed under *in vitro* callus culture

V. Yu. Stupko, S. Yu. Lugovtsova

Krasnoyarsk Agricultural Research Institute, Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center", Siberian branch, Russian Academy of Sciences, prosp. Svobodnyi, 66, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract. The aim was to compare the productivity and stability of regenerant lines of spring oats and their donor varieties: husk (Tubinsky st. – 3 lines, Sayan – 3, Kazyr – 1) and huskless (Tyumensky golozerny – 3, Golets – 2). Field tests were carried out in the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory on leached chernozem. Criteria for evaluating stability: superiority index P_i , which determines the degree of deviation of the sample from the maximum yield in each of the environments (years); index $S^{(1)}$, which characterises the predictability of the response of the genotype to conditions; index $S^{(3)}$, aimed at identifying highly productive and highly stable genotypes; $NP^{(2)}$ index, intended for the selection of genotypes with the optimal ratio of productivity and stability. Most of the regenerants formed the yield and 1000-grain weight close to the donor varieties. The exception was three lines of the Tubinsky variety, which surpassed it in terms of productivity on average over three years: CP6-Tub. – by 1.78 t/ha, CP11-Tub. – by 2.45 t/ha, CP15-Tub. – by 2.95 t/ha. At the same time, the 1000-grain weight of the line SR6-Tub. was lower than that of the original variety by 1.9 g, ZR4-Golets – by 1.4 g. The ZR15-Kazyr line was inferior in this parameter to the donor variety in 2017 by 1.4 g. In 9 out of 12 studied lines, the rank in terms of yield stability indices P_i and $S^{(1)}$ was on average 5.7 higher than in the initial donor varieties. According to the 1000-grain weight, a similar result was observed in 4 (P_i higher by 2.25 ranks) and 8 ($S^{(1)}$ – by 6.6 ranks) regenerants. According to the $S^{(3)}$ index, 6 out of 12 lines outperformed the donors by an average of 7 ranks, and in the weight of 1000 grains, 9 lines outperformed the donors by 5.3 ranks. The rank on the $NP^{(2)}$ index is higher than that of donors, by 5.5 in terms of yield was observed in 4 lines, by 6.2 in terms of weight of 1000 grains in 10 lines.

Keywords: oats (*Avena sativa*); callus culture; regenerants; phenotypic stability; oat breeding; productivity.

Author Details: V. Yu. Stupko, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow (e-mail: stupko@list.ru); S. Yu. Lugovtsova, senior research fellow.

For citation: Stupko VYu, Lugovtsova SYu. [Evaluation of the stability of oat regenerant lines formed under *in vitro* callus culture]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023;37(3):28–33. Russian. doi: 10.53859/02352451_2023_37_3_28.

Комплекс абиотических воздействий, которым подвергаются сельскохозяйственные культуры в процессе вегетации, во многом определяет их урожайность. Наибольшую опасность представляют засуха, низкие температуры, заморозки, жара и засоление почв. По оценкам экспертов к 2050 г. более половины пахотных земель в мире будут относиться к засушливым областям с высоким содержанием соли [1]. Процесс создания устойчивых сортов занимает достаточно много времени. Работы в отношении наиболее распространенных культур – пшеницы и ячменя – уже привели к созданию генотипов с высокой способностью к переживанию засухи [2] и устойчивостью к засолению [3]. В то время, как

в отношении овса число селекционных проектов не так велико [4], несмотря на то, что эту сельскохозяйственную культуру считают менее засухоустойчивой [5].

Кодним из методов создания форм с устойчивостью к абиотическим факторам среды относят клеточную селекцию [6, 7]. В работе с овсом этот подход также успешно применяют [8]. Помимо устойчивости к абиотическим факторам в селекции также важно повышение адаптивности сортов [9]. На фоне эдафического стресса степень снижения урожайности овса обратно пропорционально его продуктивности в благоприятных условиях [10]. В связи с чем использование в селекции на стабильность высокоурожайных форм оправданно. Один из эффек-

тов клеточной селекции на устойчивость к стрессовым факторам, установленным для пшеницы [11] и ячменя [12], – большая фенотипическая стабильность, в сравнении с донорными генотипами при сохранении высокой урожайности.

Цель исследования – оценка продуктивности и стабильности регенерантных линий овса, созданных методами клеточной селекции на устойчивость к засухе или засолению почвы в каллусной культуре, имитирующих, в сравнении с их донорными сортами.

Условия, материалы и методы. В качестве донорных генотипов в работе использовали сорта ярового овса Тюменский голозерный, Тубинский, Саян, Казыр, Голец. Регенерантные линии отбирали в условиях каллусной культуры на этапе пролиферации на селективных средах, содержащих высокие концентрации NaCl (0,42 %) или полиэтиленгликоль-6000 (16 % масса/объем). Эксплантами для получения каллусов служили незрелые зародыши овса в фазе Z-75 (молочно-восковая спелость) (Zadoks J. C., Chang T. T., Konzak C. F. A decimal code for the growth stages of cereals // Weed Res. 1974. Vol. 14. P. 415–421. doi: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x). Каллусогенез индуцировали на среде Мурасиге-Скуга внесением 3 мг/л 2,4-Д и 2 мг/л ИУК, пролиферацию каллуса стимулировали пассивированием на среде со сниженной вдвое концентрацией 2,4-Д. Порядок этапов отбора и условия культивирования аналогичны, использованным для создания регенерантов ячменя [12]. Полученное в условиях светокультуры семенное потомство регенерантов (табл. 1) размножали в условиях севооборотов КрСНИИСХ.

Таблица 1. Регенерантные линии овса, полученные в каллусной культуре

Регенерантная линия селективного давления на этапе пролиферации	Донорный сорт
CP15-Туб. / NaCl (0,42 %)	Тубинский
CP11-Туб. / NaCl (0,42 %)	
CP6-Туб. / NaCl (0,42 %)	
CP2-Тюм.гол. / NaCl (0,42 %)	
CP3-Тюм.гол. / NaCl (0,42 %)	Тюменский голозерный
CP4-Тюм.гол. / NaCl (0,42 %)	
ЗР4-Голец / полиэтиленгликоль-6000 (16 % масса/объем)	
CP31-Голец / NaCl (0,42 %)	
CP7-Саян / NaCl (0,42 %)	Саян
CP14-Саян / NaCl (0,42 %)	
ЗР1-Саян / полиэтиленгликоль-6000 (16 % масса/объем)	
ЗР15-Казыр / полиэтиленгликоль-6000 (16 % масса/объем)	

Полевые испытания регенерантных линий совместно с донорными сортами проводили в 2016–2018 гг. на опытных полях, расположенных в центральной части Красноярской лесостепи (ОПХ «Минино»), согласно методике ГСИ (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур/под ред. Федина М. А. и др. М.: Колос, 1989).

Метеоусловия трёх лет экспериментов заметно отличались между собой (табл. 2). В 2016 г. май был прохладным и дождливым. Среднемесячная температура 8,7 °С, осадков 177,9 % к норме. Среднесуточная температура

июня была выше нормы на 4,3 °С, осадков выпало 89 % к норме. В июле температура была выше нормы на 1,6 °С. Выпавшие 8 июля ливневые осадки (114 мм), обеспечили влагу для налива зерна. В августе температура и осадки были близки к норме. 2017 год отличался малым количеством осадков второй и третьей декады мая, а также первой декады июня. Июль был близок к норме по температуре и количеству осадков. Август отличался ливневыми осадками (283 % к среднемноголетним), сопровождающимися низкими температурами. 2018 год характеризовался как засушливый на протяжении всего вегетационного периода.

Почва – чернозем обыкновенный маломощный, содержание гумуса (по Тюрину) – 6,00 %, N-NO₃ (с помощью ионометрического экспресс-метода) – 31,3 мг/кг почвы, P₂O₅ (по Мачигину) – 5,00 мг/100 г почвы, K₂O (по Мачигину) – 21,9 мг/100 г почвы, реакция почвенного раствора – нейтральная (рН 6,8). Предшественник – чистый пар. Сроки высева 20...25 мая. Площадь делянок 1 м² (n=3). Нормы высева – 500 всхожих семян/м².

Статистическую обработку данных проводили с использованием статистического пакета R 4.0.4 в среде разработки RStudio 1.4.1103 (2009–2021 RStudio, PBC). Анализировали урожайность и массу 1000 зерен регенерантных линий и их донорных генотипов. В рамках взаимодействия факторов «генотип×год» соответствие распределения данных нормальному оценивали тестом Шапиро-Уилка, гомогенность дисперсий – по критерию Левина.

В качестве критериев оценки стабильности образцов использовали индекс превосходства P_r , определяющий степень отклонения образца от максимальной урожайности в каждой из сред (лет); индекс $S^{(1)}$, который характеризует, по аналогии с квадратичным отклонением С. Эберхарта и У. Расселла предсказуемость реакции генотипа на условия; индекс $S^{(3)}$, направленный на выявление высокопродуктивных и высокостабильных генотипов; индекс $NP^{(2)}$, предназначенный для отбора генотипов с оптимальным соотношением продуктивности и стабильности. Индексы рассчитывали с применением пакета функций «Metan» для R 4.0.4 [13]. Подробнее порядок расчётов и обоснование выбора индексов представлен в [12].

Достоверность влияния генотипа и года на параметры продуктивности оценивали тестом Краскела-Уоллиса. Данные представлены в виде медианных значений (Me) и интерквартильного размаха [25 %/75 %]. В качестве апостериорного анализа использовали тест Манна-Уитни с поправкой Холма-Бонферрони.

Результаты и обсуждение. Параметры стабильности часто рассчитывают для значений урожайности генотипов [14]. Для большего удобства соотнесения результатов, полученных на посевах регенерантных линий овса, с опубликованными ранее данными по аналогичным экспериментам с ячменем [12] и пшеницей [11] в текущей

Таблица 2. Метеоусловия периода вегетации (2016–2018 гг.).

Месяц	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Среднесуточная температура воздуха						
		°С		% к среднемноголетней		
Май	8,7	11,2	7,9	87,0	107,7	76,0
Июнь	19,3	20,2	19,8	128,7	134,7	124,5
Июль	20,6	22,0	17,7	108,4	115,8	94,7
Август	16,7	18,0	18,0	104,4	112,5	114,6
Количество осадков						
		мм		% к среднемноголетнему		
Май	51,6	61,0	38,0	177,9	138,6	86,4
Июнь	38,3	44,0	55,0	89,1	69,8	87,3
Июль	147,4	43,0	41,0	223,3	56,6	53,9
Август	56,1	190,0	30,0	92,0	283,6	44,8

Таблица 3. Масса 1000 зерен регенерантных линий овса и их донорных генотипов в условиях ОПХ «Минино» (г, Ме [25/75])*

Генотип	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее за 2016–2018 гг.
Тубинский st.	40,1 [36,6/40,6] ^a	38,0 [37,1/38,8] ^a	39,6 [38,0/41,6] ^a	38,8 [38,0/40,1] ^a
CP6-Туб.	37,4 [36,9/38,0] ^a	36,6 [35,2/36,9] ^a	36,6 [36,0/40,4] ^{b*}	36,9 [36,6/37,4] ^{b*}
CP11-Туб.	40,1 [39,2/40,8] ^a	37,7 [36,2/37,8] ^a	39,2 [39,0/39,2] ^a	39,2 [37,8/39,2] ^a
CP15-Туб.	39,4 [38,2/41,3] ^a	34,9 [34,8/38,1] ^a	38,8 [37,6/41,4] ^a	38,2 [37,6/39,4] ^a
Саян	39,2 [37,5/49,9] ^a	37,7 [37,6/38,0] ^a	38,6 [36,8/40,1] ^a	38,0 [37,6/39,2] ^a
CP7-Саян	35,7 [35,4/42,3] ^a	37,2 [32,6/38,4] ^a	37,8 [37,6/37,9] ^a	37,6 [35,7/37,9] ^a
CP14-Саян	38,5 [35,7/38,9] ^a	37,0 [36,1/38,0] ^a	37,3 [37,2/38,2] ^a	37,3 [37,1/38,3] ^a
ЗР1-Саян	37,6 [36,2/38,8] ^a	36,7 [36,6/38,2] ^a	39,4 [38,8/39,6] ^a	38,2 [36,7/38,9] ^a
Казыр	37,1 [34,3/39,3] ^a	36,3 [35,3/37,7] ^a	35,3 [35,0/37,1] ^a	36,3 [35,3/37,1] ^a
ЗР15-Казыр	38,4 [31,9/39,3] ^a	34,9 [33,7/35,0] ^b	36,3 [35,5/37,1] ^a	35,5 [34,9/37,1] ^a
Тюменский голозерный	25,5 [25,1/25,5] ^a	21,3 [18,2/22,7] ^a	24,5 [24,4/27,0] ^a	24,5 [22,7/25,5] ^{a*}
CP2-Тюм.гол.	29,8 [26,2/38,3] ^a	19,2 [19,0/23,2] ^a	25,5 [24,8/30,2] ^a	25,5 [23,2/29,8] ^{a*}
CP3-Тюм.гол.	26,1 [24,5/27,7] ^a	23,0 [22,7/23,1] ^a	24,6 [23,5/25,5] ^a	24,5 [23,1/25,5] ^{a*}
CP4-Тюм.гол.	26,7 [26,5/30,2] ^a	23,6 [23,4/24,0] ^a	24,6 [23,7/25,4] ^a	24,6 [23,7/26,5] ^{a*}
Голец	27,5 [26,5/30,3] ^a	24,4 [23,2/24,7] ^a	23,4 [23,4/23,8] ^{ab}	24,4 [23,5/26,5] ^{a*}
CP31-Голец	25,3 [25,0/26,3] ^a	22,1 [21,8/22,7] ^a	23,0 [22,6/23,1] ^b	23,0 [22,6/25,0] ^{a*}
ЗР4-Голец	23,0 [20,3/26,0] ^a	21,6 [17,9/22,9] ^a	24,2 [24,0/24,8] ^a	23,0 [21,6/24,3] ^{a*}
Медиана	32,2 [26,5/38,9] ^A	34,9 [23,1/37,2] ^B	36,3 [24,6/38,7] ^{AB}	35,7 [24,8/38,0]

a, b, A, B – здесь и в таб. 4 одинаковыми строчными буквами отмечены значения не различающиеся в рамках одного донорного генотипа при $p < 0,05$;

* значения статистически значимо отличающиеся от результатов стандартного сорта при $p < 0,05$; одинаковыми прописными буквами отмечены медианные значения массы 1000 зерен для года не различающиеся при $p < 0,05$.

работе был задействован, наряду с параметром «урожайность зерна», параметр «масса 1000 зерен».

Распределение значений урожайности и массы 1000 зерен для генотипов овса в большинстве вариантов «генотип×год» не отличались от нормального ($W > 0,75$, $p > 0,1$). Однако, тест Левина показал достоверное различие дисперсий между сравниваемыми выборками ($F = 4,67$, $p < 0,01$). В связи с этим параметрический дисперсионный анализ не мог быть применен и были использованы непараметрические методы статистического анализа и индексы стабильности.

Результаты теста Краскела-Уоллиса подтвердили отсутствие статистически значимых различий между донорными генотипами и регенерантными линиями в большинстве случаев по массе 1000 зерен и урожайности (табл. 3, 4). Так, в наиболее благоприятный согласно индексу превосходства среды 2016 г. ($P_{i, M100, 2016} = 1,37$; $P_{i, Yp, 2016} = 0,14$) статистически значимых различий как по урожайности, так и по массе 1000 зерен между регенерантными линиями и донорными сортами не выявлено. Здесь в условиях больших объемов запасов почвенной влаги и теплой погоды июня и июля, а также выпавшие в

начале июля осадков позволили сформировать объемный колос и способствовали наливу зерна. Индексы P_i для фактора «среда», определенные по данным массы 1000 зерен, имели большее варьирование, чем рассчитанные по данным урожайности. Характер распределения величин массы 1000 зерен достоверно изменялся из года в год ($H(2, N=153) = 10,6$; $p = 0,0051$), в то время как медианные значения урожайности по годам не различались ($H(2, N=153) = 1,72$; $p = 0,42$).

В условиях наименее благоприятного 2017 г. ($P_{i, M100, 2017} = -1,62$; $P_{i, Yp, 2017} = -0,24$) регенерантная линия ЗР15-Казыр имела массу зерна на 1,4 г ниже донорного генотипа. Низкая урожайность, на 3,1 т/га ниже, чем в 2016 г. и на 1,6 т/га ниже, чем в 2018 г., в этот год связана с жаркими и засушливыми июнем и июлем, и последующими ливневыми осадками августа в сочетании с низкими температурами второй и третьей декадой августа (см. табл. 2). Однако в этих условиях ни один из регенерантов, не обеспечил превосходство по исследованным параметрам продуктивности над донорным генотипом.

В более благоприятных условиях 2018 г., который, однако, отличался засушливыми условиями на протяжении

Таблица 4. Урожайность регенерантных линий овса и их донорных генотипов в условиях ОПХ «Минино» (г, Ме [25/75])

Генотип	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее за 2016–2018 гг.
Тубинский st.	2,20 [1,72/2,56] ^a	2,95 [2,90/4,50] ^a	4,70 [3,30/6,30] ^a	2,95 [2,56/4,50] ^a
CP6-Туб.	4,91 [4,73/5,03] ^a	4,40 [3,70/4,55] ^a	5,20 [3,95/5,20] ^a	4,73 [4,40/5,03] ^{b*}
CP11-Туб.	4,05 [3,59/6,98] ^a	4,50 [3,50/5,40] ^a	5,80 [5,50/6,75] ^a	5,40 [4,05/5,80] ^{b*}
CP15-Туб.	6,27 [5,10/6,85] ^a	4,10 [4,00/4,60] ^a	5,25 [3,50/5,40] ^a	5,10 [4,10/5,40] ^{b*}
Саян	3,83 [3,44/4,55] ^a	4,25 [3,60/4,70] ^a	4,65 [4,10/5,30] ^a	4,25 [3,83/4,65] ^a
CP7-Саян	4,17 [3,18/5,73] ^a	3,60 [2,85/4,00] ^a	5,30 [3,65/5,30] ^a	4,00 [3,60/5,30] ^a
CP14-Саян	6,33 [6,08/6,53] ^a	4,35 [4,00/4,60] ^a	5,15 [3,60/6,05] ^a	5,15 [4,35/6,08] ^a
ЗР1-Саян	8,86 [6,47/9,56] ^a	4,30 [3,90/4,70] ^a	3,70 [2,90/5,80] ^a	4,70 [3,90/6,47] ^a
Казыр	4,72 [4,16/6,01] ^a	5,80 [4,40/5,90] ^a	4,10 [4,10/4,80] ^a	4,72 [4,16/5,80] ^a
ЗР15-Казыр	2,65 [2,50/4,63] ^a	6,30 [5,20/6,50] ^a	5,03 [4,50/5,55] ^a	5,03 [4,50/5,55] ^a
Тюменский голозерный	2,31 [2,09/2,97] ^a	3,20 [2,70/3,70] ^a	3,00 [2,50/3,90] ^a	2,97 [2,50/3,20] ^a
CP2-Тюм.гол.	2,97 [2,06/3,86] ^a	2,40 [2,35/2,40] ^a	2,85 [2,80/3,20] ^a	2,80 [2,40/2,97] ^a
CP3-Тюм.гол.	3,96 [3,58/6,18] ^a	3,50 [1,80/3,70] ^a	3,15 [2,65/4,40] ^a	3,58 [3,15/3,96] ^a
CP4-Тюм.гол.	3,38 [2,58/6,08] ^a	3,20 [2,90/3,70] ^a	3,20 [3,10/3,40] ^a	3,20 [3,10/3,40] ^a
Голец	2,14 [1,62/2,63] ^a	2,80 [2,60/3,70] ^a	3,15 [2,65/3,85] ^a	2,65 [2,60/3,15] ^a
CP31-Голец	1,61 [1,18/2,42] ^a	2,45 [2,10/2,80] ^a	2,30 [2,10/3,30] ^a	2,30 [2,10/2,45] ^{ab}
ЗР4-Голец	3,72 [2,88/4,06] ^a	2,75 [2,30/2,75] ^a	3,20 [2,90/3,50] ^a	2,90 [2,75/3,50] ^b
Медиана	3,86 [2,58/5,73] ^A	3,70 [2,80/4,50] ^A	3,90 [3,15/5,20] ^A	3,97 [2,95/5,25]

всей вегетации ($P_{i, M100, 2018} = 0,25$; $P_{i, Yp, 2018} = 0,10$), показано превышение по урожайности и по массе 1000 зерен ЗР4-Голец, со среды, имитирующей засуху, над СР31-Голец, отобранном на устойчивость к засолению. В то время как по урожайности за три года регенерантная линия ЗР4-Голец уступила своему донорному сорту на 1,4 г. В 2018 г. регенерантная линия с засолённой среды, СР6-Туб. сформировала зерна с меньшей массой 1000 зерен на 3 г, чем донорный сорт Тубинский – стандарт для региона. По результатам, полученным за три года, она также уступила этому сорту по массе 1000 зерен на 1,9 г, как и голозерные сорта Голец и Тюменский голозерный и их регенерантные линии. При этом, все три линии от сорта Тубинский превзошли его по средней за три года урожайности: СР6-Туб. – на 1,78 т/га, СР11-Туб. – на 2,45 т/га, СР15-Туб. – на 2,95 т/га.

Близкие к донорным генотипам или более низкие величины массы 1000 зерен показаны ранее и для регенерантных линий яровой мягкой пшеницы [11] и ячменя [12] в благоприятные или избыточные по увлажнению годы. В работе с овсом использованы исключительно районированные сорта, что делает получение более урожайных, чем доноры, регенерантных линий маловероятным [15]. В работе [16] регенерантные линии, полученные на средах

Таблица 5. Индексы стабильности массы 1000 зерен и урожайности регенерантных линий ярового овса и их донорных генотипов

Генотип	P_i		$S^{(1)}$		$S^{(3)}$		$NP^{(2)}$	
	масса 1000 зерен	урожайность	масса 1000 зерен	урожайность	масса 1000 зерен	урожайность	масса 1000 зерен	урожайность
Тубинский	1,60	7,63	5,50	7,67	0,38	6,25	3,67	0,50
СР6-Туб.	5,03	2,72	5,17	2,00	0,06	0,37	0,48	0,20
СР11-Туб.	0,96	2,35	2,67	6,17	0,13	0,86	0,22	1,11
СР15-Туб.	1,85	1,63	6,17	6,50	1,99	0,68	1,22	0,67
Саян	0,25	4,01	6,83	5,83	0,57	0,29	2,17	0,29
СР7-Саян	4,51	3,91	2,50	6,00	0,40	0,45	0,22	0,46
СР14-Саян	4,33	1,32	6,83	7,17	0,40	0,13	0,72	1,56
ЗР1-Саян	3,81	1,07	7,50	10,50	0,78	3,21	1,17	1,07
Казыр	7,74	2,39	7,67	8,00	0,90	2,00	0,44	1,17
ЗР15-Казыр	9,34	4,39	3,67	8,67	0,08	5,69	0,07	2,67
Тюменский голозерный	131,45	8,38	7,50	5,67	3,20	1,08	0,29	0,24
СР2-Тюм.гол.	98,22	8,49	8,83	1,50	4,80	3,25	0,48	0,02
СР3-Тюм.гол.	119,48	4,95	3,17	5,17	0,15	3,36	0,14	0,27
СР4-Тюм.гол.	107,24	5,60	6,17	4,50	0,13	0,64	0,28	0,27
Голец	108,91	9,11	9,33	8,33	2,80	1,50	0,42	0,28
СР31-Голец	135,24	11,26	4,67	5,17	1,75	0,50	0,20	0,18
ЗР4-Голец	149,56	7,00	8,50	5,83	1,14	1,86	0,29	0,12

с ПЭГ (имитация засухи) имели близкую к донорным генотипам урожайность (108 %). В то время, как отобранные на устойчивость к токсическому воздействию алюминия в 1,5 раза превышали исходный донорный генотип.

Масса 1000 зерен варьировала у голозерных форм от 23,0 г до 25,5 г, в то время как для пленчатых форм диапазон был 35,5...39,2 г (табл. 5). Значения индексов разнятся на порядок у двух форм овса: для пленчатых форм P_i варьирует от 0,25 до 9,34, в то время, как у голозерных форм – от 98,22 до 149,56. Уменьшение значения индекса P_i на фоне увеличения параметра продуктивности показано так же в работе [17].

При ранжировании установлено, что все голозерные генотипы расположены правее по оси ранга индекса превосходства P_i , то есть имеют ранг ниже, чем пленчатые формы (рис. 1, 2).

В отношении массы 1000 зерен некоторые регенерантные линии показали превосходство над донорными генотипами лишь по одному из индексов, связанных напрямую с абсолютной величиной параметра продуктивности

ности: по индексу P_i (СР2-Тюм.гол., P_i на 33,23 меньше, чем у донора, ранг – выше на 4) или индексу отражающему предсказуемость реакции на изменение условий $S^{(1)}$ (ЗР15-Казыр – ранг выше донора на 10, СР7-Саян – выше донора на 9, СР31-Голец – на 12) (см. рис. 1, см. табл. 4). Однако, выделены три регенеранта с более высоким рангом по двум индексам: СР11-Туб. (по $NP^{(2)}$ ранг выше донора на 12; по $S^{(3)}$ – на 2), СР4-Тюм.гол. (по P_i ранг выше донора на 3; по $S^{(1)}$ – на 4) и СР3-Тюм.гол. (по P_i выше донора на 1; по $S^{(1)}$ – на 9). Эти линии располагались выше в ранге и по индексам стабильности урожайности (см. рис. 2): СР11-Туб. (выше по P_i на 11; по $S^{(1)}$ – на 3), СР4-Тюм.гол. (выше по P_i и $S^{(1)}$ на 3) и СР3-Тюм.гол. (по P_i – на 4; по $S^{(1)}$ – на 2). В отношении урожайности большую стабильность и предсказуемость параметров продуктивности, в сравнении с донорными сортами, показали и другие линии от сорта Тубинский: СР6-Туб. имел ранг по индексу P_i на 7, по $S^{(1)}$ – на 11, по $NP^{(2)}$ на 7, а по индексу $S^{(3)}$ – на 14, СР15-Туб. (ранг выше донора по P_i на 10, по $S^{(1)}$ – на 2; по $S^{(3)}$ на 10). Высокий ранг по двум индексам по стабильности урожайности, выше донора по $S^{(1)}$ на 7 и на 6 по $NP^{(2)}$, а также по массе 1000 зерен (на 2 выше по $S^{(1)}$ и $NP^{(2)}$) имела ещё одна голозерная линия ЗР4-Голец. В то время как СР31-Голец имела ранги по стабильности массы 1000 зерен и

урожайности в среднем на 6 выше, чем сорт Голец по индексам $S^{(1)}$, $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$. Интересно, что по двум линиям, СР14-Саян и ЗР1-Саян, от сорта Саян определен ранг по индексу превосходства для урожайности выше на 6 и на 7, соответственно, чем для донорного генотипа, на фоне снижения предсказуемости реакции (ранги по $S^{(1)}$ регенерантов, соответственно, ниже на 4 и на 9) (см. рис. 1, 2). Линия СР7-Саян при анализе урожайности приблизилась к донорному генотипу по двум индексам: ранги линии по индексам $S^{(1)}$ и $NP^{(2)}$ ниже на 1...2 ранга.

Индексы $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$, отражают сбалансированность величин параметров продуктивности и стабильности в рамках меняющихся условий

от года к году. По параметру масса 1000 зерен вновь

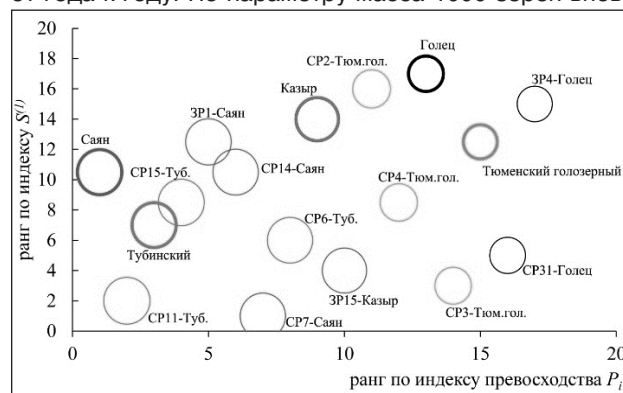


Рис. 1. Ранжирование регенерантных линий овса по значениям индексов превосходства P_i и стабильности $S^{(1)}$ массы 1000 зерен (здесь и на рис. 2, 3, 4 – чем больше диаметр, тем выше величина рассматриваемого параметра продуктивности. Утолщенными линиями отмечены донорные генотипы).

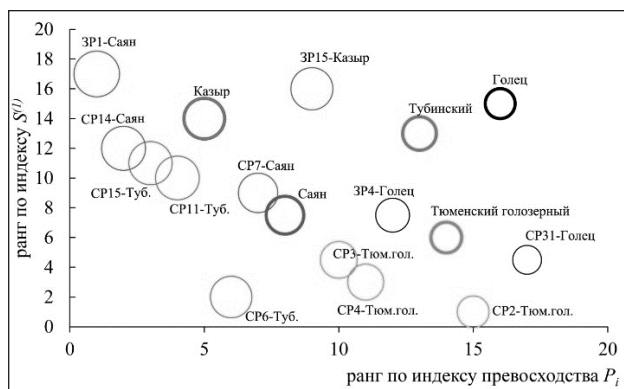


Рис. 2. Ранжирование регенерантных линий овса по значениям индексов превосходства P_i и стабильности $S^{(1)}$ урожайности.

показано превосходство в рангах над донорным сортом линий СР3-Тюм.гол. (на 6 рангов по $NP^{(2)}$ и на 11 по $S^{(3)}$) и СР4-Тюм.гол. (по $NP^{(2)}$ – на 2, по $S^{(3)}$ – на 13) (рис. 3). Выше, чем у сорта Тубинский, ранг по двум индексам у линии СР11-Туб. (на 12 по $NP^{(2)}$ и на 2 по $S^{(3)}$). Линии от сорта Голец также расположены левее и ниже своего донорного генотипа на графике (см. рис. 3). Обращает на себя внимание линия ЗР15-Казыр, чьи индексы $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$ ниже таковых у сорта Казыр на 0,38 и 0,82 соответственно (см. табл. 4), что свидетельствует о способности поддерживать, хоть и не высокие, но постоянные значения массы зерна при смене условий.

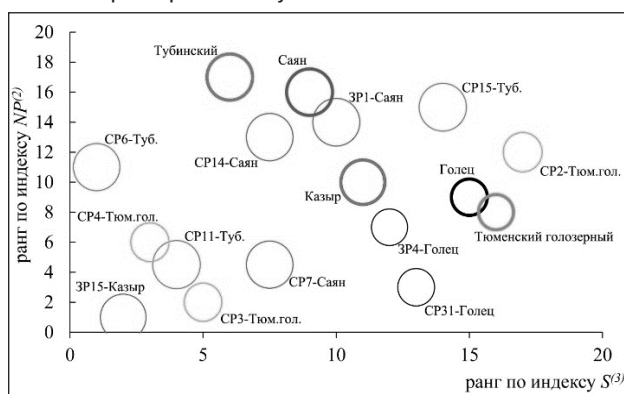


Рис. 3. Ранжирование регенерантных линий овса по значениям индексов стабильности $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$ параметра «масса 1000 зерен».

В отношении урожайности по индексам $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$ выделены линия СР6-Туб. (ранг по $NP^{(2)}$ выше донора на 7, по $S^{(3)}$ на 14), расположенная ближе всего к пересечению осей на графике (рис. 4), и линия СР31-Голец, располагающая выше донорного сорта Голец на 5 рангов выше по индексам $NP^{(2)}$ и по $S^{(3)}$. Уступали своим донорным сортам линии ЗР15-Казыр (на 2 ранга ниже по $NP^{(2)}$ и на 4 по $S^{(3)}$), СР7-Саян (по $NP^{(2)}$ на 1, по $S^{(3)}$ – на 2), ЗР1-Саян (по $NP^{(2)}$ на 4, по $S^{(3)}$ на 11) и СР3-Тюм.гол. (по $NP^{(2)}$ на 2, по $S^{(3)}$ на 6) в сбалансированности по обоим индексам. Линия СР14-Саян имела ранг на 1 выше, чем донорный

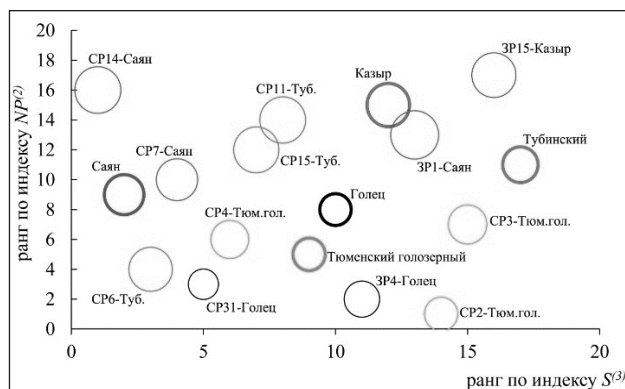


Рис. 4. Ранжирование регенерантных линий овса по значениям индексов стабильности $NP^{(2)}$ и $S^{(3)}$ параметра урожайности.

сорт Саян, и наибольший – по всему набору сортов, по индексу $S^{(3)}$, вероятно в связи с достаточно большой урожайностью, которая имеет большее влияние на этот индекс, в сравнении с индексом $NP^{(2)}$, в котором автор методики попытался нивелировать это влияние путем коррекции исходных данных при расчётах [14]. Этим может быть объяснено и расположение всех голозерных образцов ниже на графике (выше ранг по $NP^{(2)}$: 1...8), чем плёчатые сорта и линии (ранг по $NP^{(2)}$: 9...17). При меньшей степени влияния урожайности при расчёте индексов голозерные генотипы имеют меньшее отклонение от медианного ранга, индекс $NP^{(2)}$. Эта тенденция отмечена и на данных по массе 1000 зерен (см. рис. 3). В тоже время линия СР31-Голец, как уже упоминалось, была лучшей в этом отношении.

Выводы. Исследованные параметры продуктивности (урожайность и масса 1000 зерен) почти у всех регенерантов в отдельные годы находились на уровне донорных сортов. Только регенеранты от сорта Тубинский превосходили его по урожайности в среднем за три года: СР6-Туб. – на 1,78 т/га, СР11-Туб. – на 2,45 т/га, СР15-Туб. – на 2,95 т/га. При этом СР6-Туб. в среднем за 3 года и в 2018 г. уступил донору по массе 1000 зерен на 1,9 г. Меньшая, чем у донора, масса 1000 зерен отмечена у линии ЗР4-Голец (на 1,4 г), а в 2017 г. у линии ЗР15-Казыр (на 1,4 г). При этом у ряда регенерантных линий овса, полученных в результате создания соматоклональных вариаций в условиях каллусной культуры, показано увеличение фенотипической стабильности, по отношению к донорным сортам. Линии СР31-Голец и ЗР4-Голец при оценке стабильности урожайности в среднем превосходили донорный сорт на 6...7 позиций, массы 1000 зерен – на 2...6 рангов. Линии сорта Тюменский голозерный располагались выше в рангах по стабильности урожайности на 2...4 позиции, а линии СР3-Тюм.гол. и СР4-Тюм.гол. превосходили донорный сорт по стабильности массы 1000 зерен в среднем на 6 рангов по всем четырем использованным индексам. Линия СР7-Саян располагалась выше донорного сорта по стабильности массы 1000 зерен по индексам $S^{(1)}$, $NP^{(2)}$, $S^{(3)}$ в среднем на 7 рангов, линия ЗР15-Казыр – на 9 рангов.

Литература.

1. Rao S., Sandhya H. *In vitro selection and genetic engineering for abiotic stress tolerant plants and underlying mechanism* // Ramakrishna A., Gill S. S. *Metabolic adaptations in plants during abiotic stress*. UK: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2019. P. 283–290.
2. *Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research* / A. Sallam, A. M. Alqudah, M. F. A. Dawood, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20. No. 13. Article 3137. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/13/3137> (дата обращения: 28.02.2023). doi: 10.3390/ijms20133137.
3. *Opportunities for developing salt-tolerant wheat and barley varieties* / M. Asif, A. Pearson, R. Schilling, et al. // *Annual Plant Reviews*. 2019. Vol. 2. No. 1. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119312994.apr0681> (дата обращения: 28.02.2023).

28.02.2023). doi: 10.1002/9781119312994.apr0681.

4. Comparative study of the effects of salinity on growth, gas exchange, N accumulation and stable isotope signatures of forage oat (*Avena sativa* L.) genotypes / S. Sadaqat Shah, Z. Li, H. Yan, et al. // *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 8. Article 1025. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/8/1025> (дата обращения: 28.02.2023). doi: 10.3390/plants9081025.

5. Important physiological changes due to drought stress on oat / H. Xie, M. Li, Y. Chen, et al. // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2021. Vol. 9. Article 644726. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.644726/full>. (дата обращения: 28.02.2023). doi: 10.3389/fevo.2021.644726.

6. Никитина Е. Д., Хлебцова Л. П., Пронина Р. Д. Соматическая изменчивость *in vitro* как источник создания исходного материала для селекции мягкой пшеницы // *Acta Biologica Sibirica*. 2015. Т. 1. № 3-4. С. 171–186.

7. Use of cell selection tools in the creation of agricultural crop varieties resistant to abiotic stress / I. Anikina, E. Oves, Zh. Adamzhanova, et al. // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2021. Vol. 27. No. 3. P. 505–511.

8. Селекция овса на европейском северо-востоке России / Г. А. Баталова, Е. М. Лисицын, R. Changzong и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. № 1. С. 21–24.

9. Юсоев О. А., Васюкевич С. В. Оценка коллекционных образцов овса по продуктивности и биохимическим показателям в условиях южной лесостепи Западной Сибири // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2014. № 7 (117). С. 33–37.

10. Некоторые результаты и вопросы методологии селекции овса на устойчивость к эдафическому стрессу / Г. А. Баталова, И. Г. Широких, М. В. Тулякова и др. // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2015. № 4 (47). С. 9–15. doi: 10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15.

11. Ступко В. Ю., Сидоров А. В. Фенотипическая стабильность регенерантных линий яровой мягкой пшеницы // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023. Т. 184. № 1. С. 144–153. doi: 10.30901/2227-8834-2023-1-144-153.

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

13. Olivoto T., Lucio A. D. Metan: An R package for multi-environment trial analysis // *Methods in Ecology and Evolution*. 2020. Vol. 11. No. 6. P. 783–789. doi: 10.1111/2041-210X.13384.

14. Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: An applicable review for use in plant breeding programs / A. Pour-Aboughadareh, M. Khalili, P. Poczar, et al. // *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 3. Article 414. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/3/414> (дата обращения: 28.02.2023). doi: 10.3390/plants11030414.

15. 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.

16. Шуплетова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия и засухе // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016. Т. 20. № 5. С. 623–628. doi: 10.18699/VJ16.183.

17. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability / A. F. Cheshkova, P. I. Stepanchik, A. F. Aleynikov, et al. // *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020. Vol. 24. No. 3. P. 267–275. doi: 10.18699/VJ20.619.

References

1. Rao S, Sandhya H. *In vitro* selection and genetic engineering for abiotic stress tolerant plants and underlying mechanism. In: Ramakrishna A, Gill SS, editors. *Metabolic Adaptations in Plants During Abiotic Stress*. UK: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2019. p. 283-90.

2. Sallam A, Alqudah AM, Dawood MFA, et al. Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences* [Internet]. 2019 [cited 2023 Feb 28];20(13): Article 3137. Available from: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/13/3137>. doi: 10.3390/ijms20133137.

3. Asif M, Pearson A, Schilling R, et al. Opportunities for developing salt-tolerant wheat and barley varieties. *Annual Plant Reviews*. [Internet]. 2019 [cited 2023 Feb 28];2(1). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119312994.apr0681>. doi: 10.1002/9781119312994.apr0681.

4. Sadaqat Shah S, Li Z, Yan H, et al. Comparative study of the effects of salinity on growth, gas exchange, N accumulation and stable isotope signatures of forage oat (*Avena sativa* L.) genotypes. *Plants* [Internet]. 2020 [cited 2023 Feb 28];9(8): Article 1025. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/8/1025>. doi: 10.3390/plants9081025.

5. Xie H, Li M, Chen Y, et al. Important physiological changes due to drought stress on oat. *Frontiers in Ecology and Evolution* [Internet]. 2021 [cited 2023 Feb 28];9: Article 644726. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.644726/full>. doi: 10.3389/fevo.2021.644726.

6. Nikitina ED, Khlebova LP, Pronina RD. [In vitro somaclonal variation as initial material for bread wheat breeding]. *Acta Biologica Sibirica*. 2015;1(3-4):171-86. Russian.

7. Anikina I, Oves E, Adamzhanova Zh, et al. Use of cell selection tools in the creation of agricultural crop varieties resistant to abiotic stress. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2021;27(3):505-11.

8. Batalova GA, Lisitsyn EM, Changzong R, et al. [Oats breeding in European North-East of Russia]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2016;30(1):21-4. Russian.

9. Yusova OA, Vasyukevich SV. [Evaluation of oat collection in terms of productivity and biochemical indices under the conditions of the southern forest-steppe of West Siberia]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014;(7):33-7. Russian.

10. Batalova GA, Shirokikh IG, Tulyakova MV, et al. [Some results and methodical aspects of oats breeding for resistance against edaphic stress]. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka*. 2015;(4):9-15. Russian. doi: 10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15.

11. Stupko VYu, Sidorov AV. [Phenotypic stability of spring common wheat regenerative lines]. *Trudi po prikladnoy botanike, genetike i selekcii*. 2023;184(1):144-153. Russian. doi: 10.30901/2227-8834-2023-1-144-153.

12. Lugovtsova SYu, Stupko VYu. [Estimation of the stability of barley regenerated lines within the current breeding process]. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2022;14(5):26-32. Russian. doi: 10.31367/2079-8725-2022-82-5-26-32.

13. Olivoto T, Lucio AD. Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*. 2020;11(6):783-9. doi: 10.1111/2041-210X.13384.

14. Pour-Aboughadareh A, Khalili M, Poczar P, et al. Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: An applicable review for use in plant breeding programs. *Plants* [Internet]. 2022 [cited 2023 Feb 28];11(3): Article 414. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/3/414>. doi: 10.3390/plants11030414.

15. Rozhanskaya OA, Gorshkova EM. [In vitro culture as a source of biodiversity for soybean breeding]. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*. 2019;(4):24-31. Russian. doi: 10.26898/0370-8799-2019-4-3.

16. Shupletsova ON, Shchennikova IN. [Results of using cell technologies for creation of new barley varieties resistant against aluminum toxicity and drought]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selekcii*. 2016;20(5):623-8. Russian. doi: 10.18699/VJ16.183.

17. Cheshkova AF, Stepanchik PI, Aleynikov AF, et al. A comparison of statistical methods for assessing winter wheat grain yield stability. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(3):267-75. doi: 10.18699/VJ20.619.