



## Особенности наследования лизина у гибридов второго поколения зернового сорго

© 2020. **А. В. Алабушев**, В. В. Ковтунов✉, П. И. Костылев, Н. А. Ковтунова, Н. С. Кравченко

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация

*Сорго считается одной из наиболее важных зерновых культур в мире. Зерно сорго характеризуется низким содержанием в белке незаменимых аминокислот, прежде всего лизина, что значительно снижает его кормовую ценность. Известны два мутантных гена с высоким уровнем лизина: спонтанный мутантный ген *hl*, который был первоначально идентифицирован в эфиопских линиях, и ген *P721*, который индуцирован этилметансульфонатом. Цель исследований заключалась в изучении закономерности наследования содержания лизина в зерне гибридов второго поколения сорго зернового, полученных в результате скрещиваний по двум диаллельным схемам 4x4 (I – СПЗС-11, Sb-126/4, 144 ф/8, Зерноградское 204; II – ЗСК-4, Белозёрное 100, Отбор 100, 34045). В результате гибридологического анализа установлено, что по содержанию лизина в белке сорго между включёнными в скрещивания родительскими образцами наблюдались генетические отличия в 1-3 гена. Наибольшие различия (3 гена) проявились между образцами сорго зернового 34045 и 144 ф/8. В большинстве гибридных комбинаций между привлечёнными в гибридизацию образцами наблюдались моногенные и дигенные различия. В результате оценки значения степени доминирования установлена величина проявления гена, контролирующего содержание лизина в белке сорго. Наблюдалось доминирование как меньших, так и больших значений признака. Кривые распределения частот изученных гибридов находились в пределах изменчивости родительских форм, однако в отдельных комбинациях проявились положительные трансгрессии. В комбинациях Sb-126/4 × СПЗС-11, Зерноградское 204 × СПЗС-11 для дальнейшей селекционной работы выделены формы с высоким содержанием лизина в зерне (более 3,5%).*

**Ключевые слова:** лизин в белке, *Sorghum bicolor*; ген, зерно, расщепление, доминирование, асимметрия

**Благодарности:** работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (тема №0706-2019-0001).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Алабушев А. В., Ковтунов В. В., Костылев П. И., Ковтунова Н. А., Кравченко Н. С. Особенности наследования лизина у гибридов второго поколения зернового сорго. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(3):273-282. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.273-282>

Поступила: 06.04.2020

Принята к публикации: 28.05.2020

Опубликована онлайн: 23.06.2020

## Features of lysine inheritance in grain sorghum hybrids of the second generation

© 2020. **Andrey V. Alabushev**, Vladimir V. Kovtunov✉, Pavel I. Kostylev, Nataliya A. Kovtunova, Nina S. Kravchenko

Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Russian Federation

*Sorghum is one of the most important grain crops in the world. Sorghum grain is characterized by a low percentage of essential amino acids in protein, primarily lysine, which significantly reduces its feed value. There are two known mutant genes with a large lysine percentage, namely the spontaneous mutant *hl* gene, which was originally identified in Ethiopian lines, and the *P721* gene, which is induced by ethylmethanesulfonate. The purpose of the current study was to identify the patterns of inheritance of the lysine percentage in grain sorghum hybrids of the second generation which were obtained by hybridization according to two 4x4 diallelic schemes (I - SPZS-11, Sb-126/4, 144 f/8, Zernogradskoe 204; II - ZSK-4, Belozerno 100, Otkor 100, 34045). The hybridological analysis has established that in lysine percentage in sorghum protein there are genetic differences of 1-3 genes between the parental samples included in the hybridization. The greatest differences (3 genes) were identified between sorghum grain samples 34045 and 144 f/8. In most hybrid combinations there have been identified monogenic and digenic differences between the samples involved in hybridization. The estimation of dominance degree has identified the value of the gene manifestation, that controls lysine percentage in sorghum protein. There has been determined the dominance of both large and small values of the trait. The frequency distribution curves of the studied hybrids were within the variability of the parental forms, however, there were positive transgressions in some combinations. In the combinations Sb-126/4 × SPZS-11, Zernogradskoe 204 × SPZS-11 there have been identified the forms with a large lysine percentage in grain (more than 3.5%) for further breeding process.*

**Keywords:** lysine percentage in protein, *Sorghum bicolor*; gene, grain, splitting, dominance, asymmetry

**Acknowledgment:** the research was carried out within the state assignment of the Agricultural Research Center “Donskoy” (theme No. 0706-2019-0001).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

*Conflict of interest:* the authors stated no conflict of interest.

*For citations:* Alabushev A. V., Kovtunov V. V., Kostylev P. I., Kovtunova N. A., Kravchenko N. S. Features of lysine inheritance in grain sorghum hybrids of the second generation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(3): 273-282. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.273-282>

Received: 06.04.2020

Accepted for publication: 28.05.2020

Published online: 23.06.2020

Сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) считается одной из наиболее ценных зерновых культур в мире. Его выращивают в 86 странах на площади 38-45 млн га при годовом объеме производства зерна около 58 млн тонн. Сорго является одним из основных источников белка для миллионов людей в Африке и Азии, а также сельскохозяйственных животных во всем мире [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Зерно сорго характеризуется невысоким содержанием в белке незаменимых аминокислот, прежде всего лизина, что существенно снижает его кормовую ценность. Биологическая значимость высоколизинового корма по сравнению с обычным высокая, поэтому целесообразно не только увеличить количество получаемой продукции, но и улучшить её качество [7, 8, 9, 10, 11].

Повышение концентрации лизина управляется рецессивным геном *hl*. Причём наличие данного гена влияет на увеличение концентрации лизина, аргинина, аспарагиновой кислоты, глицина, триптофана и снижение количества глутаминовой кислоты, пролина, аланина, лейцина [12].

Впервые о гене *hl* сообщили в 1973 г. R. Singh и J. D. Axtell [12], которыми были идентифицированы две линии эфиопского сорго IS 11758 и IS 11167 с высоким содержанием лизина – 3,3 и 3,1 г на 100 г белка, что на 60-70 % выше по сравнению с другими образцами сорго. Кроме того, эти линии отличаются высоким уровнем белка – 17,2 и 15,7 % соответственно. Они допустили, что повышенная концентрация лизина в каждой линии контролируется одним рецессивным геном, хотя неизвестно, являются ли гены из обеих линий аллельными. Зерно сорго с высоким содержанием лизина имело мучнистый эндосперм, было морщинистое и характеризовалось низкой массой 1000 зёрен. Предположено, что морщинистый фенотип, связанный с высоким содержанием лизина в исходных эфиопских линиях сорго, может быть обусловлен плеiotропным эффектом самого гена *hl*. Также это может быть следствием действия генов-модификаторов, которые изменяют нормаль-

ную конфигурацию зерна сорго. Полное отсутствие стекловидного крахмала в тканях эндосперма может оказывать влияние на конфигурацию зерна. Зерновки с низким содержанием лизина были выполнены и имели стекловидный эндосперм, а зерновки с высоким содержанием лизина обладали мучнистым эндоспермом. Все семена F<sub>1</sub>, полученные из скрещиваний с высоколизиновыми линиями, имели стекловидное зерно. В результате анализа гибридов F<sub>2</sub> предположили, что высокое содержание лизина имеет рецессивный характер наследования [13, 14].

В 1975 году Mohan индуцировал мутант сорго с высоким содержанием лизина, названный P-721. Во всех трех сортах сорго с высоким содержанием лизина в зародыше его содержание было в пределах нормы, но содержание в эндосперме было выше, чем в других образцах [13]. Таким образом, в настоящее время известны два мутантных гена, детерминирующих высокий уровень лизина: спонтанный мутантный ген *hl*, который был первоначально идентифицирован в эфиопских линиях, и ген *P721*, который индуцирован этилметансульфонатом [14, 15].

**Цель исследований** – изучить особенности наследования содержания лизина в белке зерна F<sub>2</sub> сорго зернового.

**Материал и методы.** Исследования проводили на опытном участке лаборатории селекции и семеноводства сорго зернового, а также в лаборатории биохимической оценки селекционного материала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Аграрный научный центр «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область). Гибридизация проведена в 2009 году, анализ гибридов второго поколения проводили в 2011-2012 годах.

В качестве объекта исследования использованы родительские образцы, а также гибриды F<sub>2</sub> сорго зернового, полученные по двум диаллельным схемам 4x4 (I – Зерноградское 204, Sb-126/4, 144 ф/8, СПЗС-11; II – ЗСК-4, 34045, Белозёрное 100, Отбор 100).

Посев проводили в оптимальные сроки (I-II декада мая) селекционной сеялкой СПЧ-6

широкорядным способом с шириной междурядья 70 см и нормой высева 280 тыс. шт./га. Площадь делянки 4,9 м<sup>2</sup>.

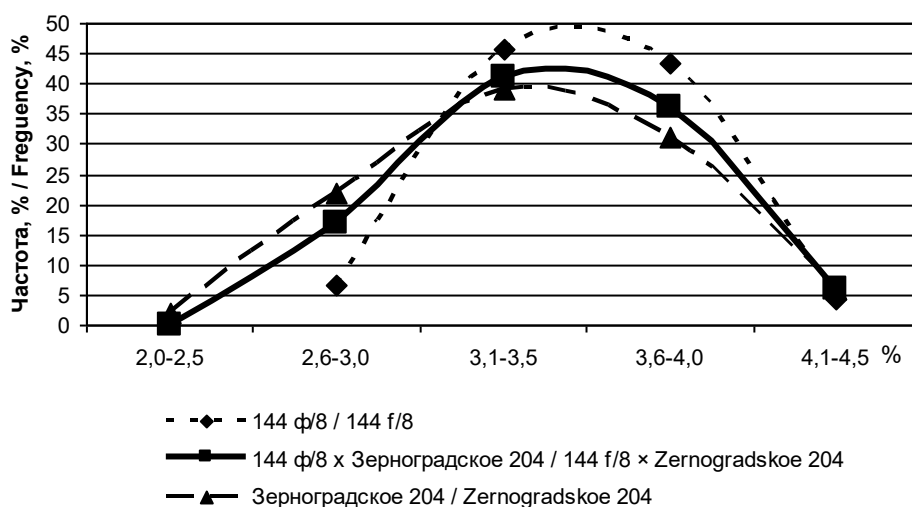
Содержание лизина определяли методом «связывания красителя ацилан оранж»<sup>1</sup> по 100-150 образцов у родительских форм и 250-300 у гибридных комбинаций.

Для генетического анализа содержания лизина в белке у гибридов второго поколения использовали компьютерную программу поиска моделей расщепления Полиген А<sup>2</sup>. Степень доминирования определяли по методу В. Griffing<sup>3</sup>.

**Результаты и их обсуждение.** В результате проведённого гибридологического анализа гибридов F<sub>2</sub> отмечено, что по содержанию

лизина в белке сорго между привлечёнными в гибридизацию исходными формами проявились генетические различия, обусловленные неаллельным взаимодействием 1-3 генов разной силы действия. Условно назовем эти гены А, В и С.

Образцы Зерноградское 204 и 144 ф/8 имели максимальное содержание лизина в белке (3,37 и 3,46 %) и не различались по аллельному составу генов. Это доказывается тем, что кривые распределения частот (КРЧ) признака родительских образцов и гибрида характеризовались сходной конфигурацией, а вершины почти совпадали (рис. 1). Поэтому их генотипы имеют генную формулу AABVCC.



**Рис. 1.** КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида F<sub>2</sub> 144 ф/8 × Зерноградское 204 /

**Fig. 1.** Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid F<sub>2</sub> 144 f/8 × Zernogradskoe 204

В этом блоке диаллельного скрещивания образец 144 ф/8 отличался по содержанию лизина (3,46 %) от образцов Sb-126/4 (2,74 %) и СПЗС-11 (2,53 %), при этом последние также различались между собой на 0,21 %. Наибольшие различия по лизину проявились между образцами 144 ф/8 и СПЗС-11 (0,93 %). Генетический анализ показал, что образец 144 ф/8 отличается от СПЗС-11 по аллельному состоянию двух пар генов. Вершина КРЧ гибрида 144 ф/8 × СПЗС-11 находилась посередине

не между родительскими формами. В результате анализа распределения частот признака «содержание лизина» в этой комбинации отмечено, что КРЧ гибрида была симметричной (As = 0,02), а степень доминирования (hp = 0,05) свидетельствует об его отсутствии. Установлено, что на долю гибрида относилось примерно 6,25 % частот родительской формы с большим содержанием лизина, что указывает на дигибридное расщепление (рис. 2). Суммарная сила этих двух генов составляет 0,93 %.

<sup>1</sup>Рядчиков В. Г. Улучшение зерновых белков и их оценка. М.: Колос, 1978. С. 110-114.

<sup>2</sup>Мережко А. Ф. Использование менделевских принципов в компьютерном анализе наследования варьирующих признаков. Экологическая генетика культурных растений: мат-лы школы молодых ученых. Краснодар, 2005. С. 107-117.

<sup>3</sup>Griffing B. Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Austral. J. Biol. Sci. 1956;(9):463-493.

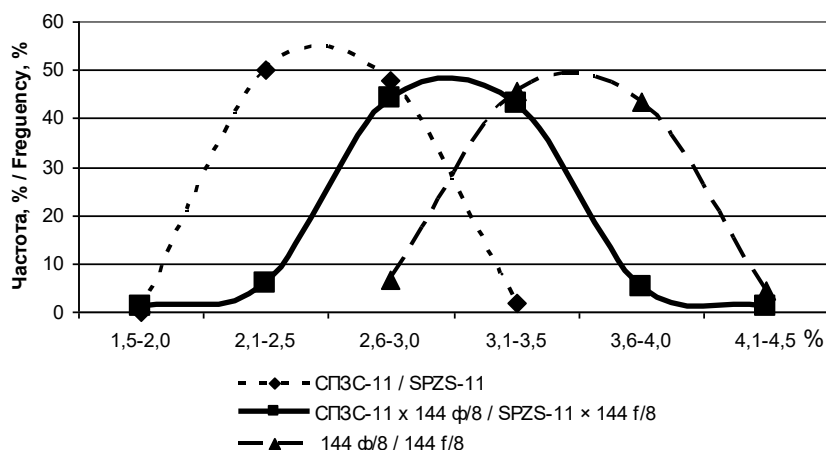


Рис. 2. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида F<sub>2</sub> СПЗС-11 × 144 ф/8 /

Fig. 2. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid F<sub>2</sub> SPZS-11 × 144 f/8

Аналогичный результат получен и в комбинации СПЗС-11 × Зерноградское 204. Генетический анализ показал, что они также отличаются по аллельному состоянию двух пар генов, но их сила равняется 0,84 %. Кривая распределения частот содержания лизина в белке зерна гибрида второго поколения была

симметричной ( $A_s=0,03$ ). Это указывает на отсутствие доминирования признака ( $h_p = -0,02$ ). Гибриду соответствовало примерно по 1/16 крайних частот каждой исходной формы, что говорит о дигенных различиях между данными образцами. Расщепление происходило в соотношении 1:4:6:4:1 (рис. 3).

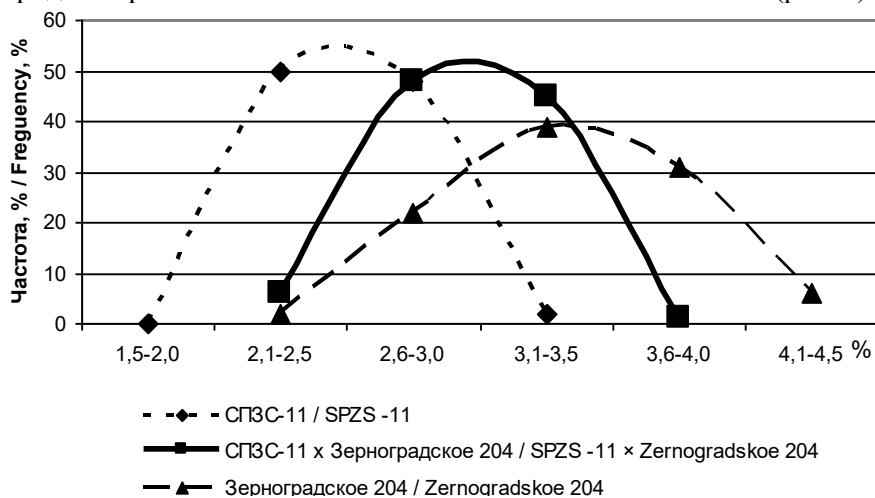


Рис. 3. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида F<sub>2</sub> СПЗС-11 × Зерноградское 204 /

Fig. 3. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid F<sub>2</sub> SPZS-11 × Zernogradskoe 204

Анализ гибридной комбинации СПЗС-11 × Sb-126/4 показал трансгрессивное расщепление (рис. 4) как в прямом, так и в обратном скрещивании. Полученная информация свидетельствует о том, что данные образцы имели в разных локусах и доминантные, и рецессивные аллели генов. У гибрида выщепилось 9/16 растений с двумя доминантными генами А и В, которые вызвали положительную трансгрессию. В этом случае генотип образца СПЗС-11 можно обозначить формулой ааВВсс,

а образца Sb-126/4 – ААbbсс. Оба они отличаются от образца 144 ф/8 (ААВВСС) и между собой по двум парам генов, однако сила этих генов различается. Гибрид, получивший оба доминантных аллеля А и В, превысил большую родительскую форму Sb-126/4 на 0,29 %. Это величина силы гена В.

У гибрида Sb-126/4 × Зерноградское 204 также установлено дигенное расщепление, которое хорошо укладывается в схему ААbbсс × ААВВСС (рис. 5).

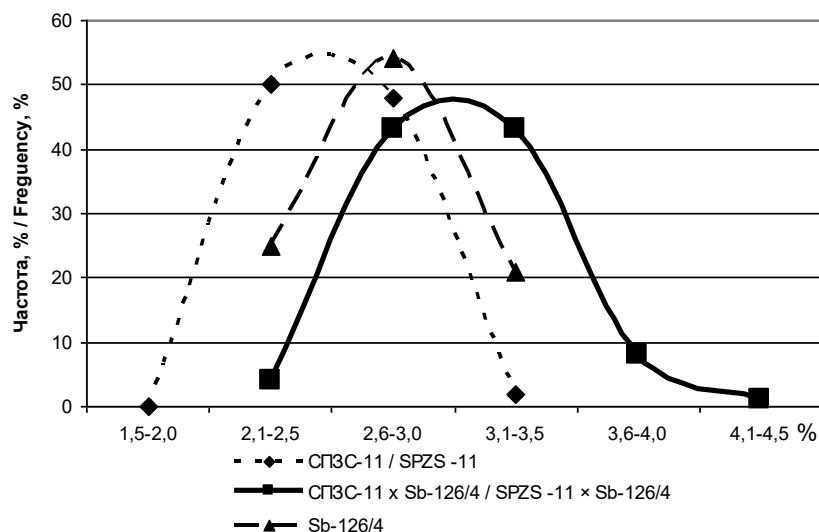


Рис. 4. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  СПЗС-11  $\times$  Sb-126/4 /

Fig. 4. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  SPZS -11  $\times$  Sb-126/4

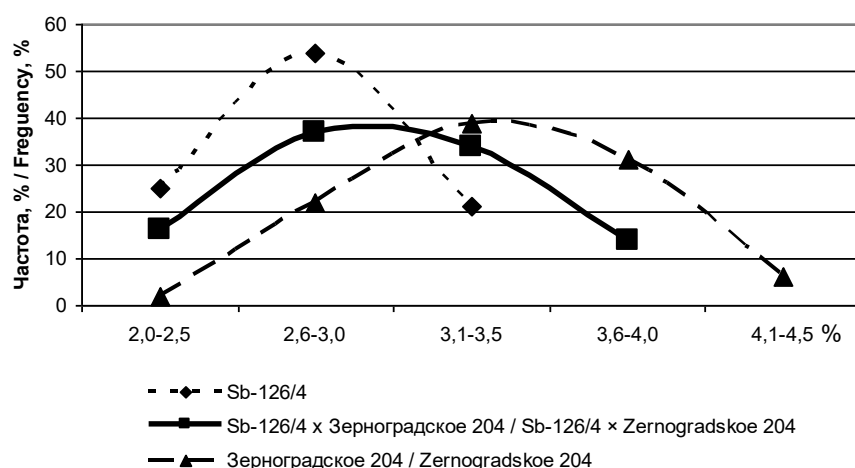


Рис. 5. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  Sb-126/4  $\times$  Зерноградское 204 /

Fig. 5. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  Sb-126/4  $\times$  Zernogradskoe 204

Расчеты показывают, что зерно растений с генотипом ААВВсс должно содержать 3,03 % лизина (2,74+0,29). Такой образец есть во втором блоке диаллельного скрещивания – Отбор 100 (3,03 %). Самое низкое содержание лизина было у образца 34045 – 2,41 %. Промежуточное между ними содержание имелось у образца ЗСК-4 (2,88 %) и Белозерное 100 (2,81 %).

Гибридологический анализ и сопоставление частот исходных образцов и крайних частот гибрида популяции  $F_2$  34045  $\times$  Отбор 100 показал отличия по двум парам генов и расщепление в соотношении 15:1 (рис. 6).

Степень доминирования ( $h_p = 0,45$ ) свидетельствует о частичном доминировании больших значений признака, а КРЧ была смещена вправо. Сила генов равнялась 0,58 %. В данной комбинации выделились формы с высокой концентрацией лизина в белке. У образца 34045 содержание лизина (2,41 %) было меньше, чем у образца из 1-го блока СПЗС 11 (2,53 %), генотип которого имел формулу ааВВсс. Следовательно, генотип 34045 был рецессивным по всем аллелям, а скрещивание было типа ааbbсс  $\times$  ААВВсс, т. е. родительские формы различались по аллелям гена А и В.

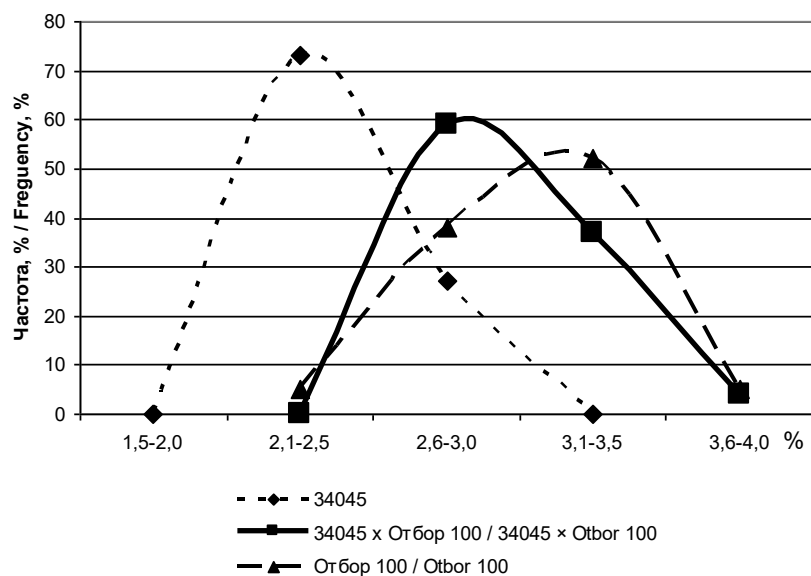


Рис. 6. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  34045 × Отбор 100 /

Fig. 6. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  34045 × Otbor 100

Анализ второго поколения гибрида Белозерное 100 × ЗСК-4 с помощью программы Полиген А показал, что они не различаются по аллельному составу генов, так как конфигурации КРЧ их и гибрида были идентичными. Поскольку содержание лизина у них было на уровне образца Sb-126/4, имеющего генотип AAbbсс, то можно предположить, что

они идентичны. Это подтверждается и графиками других гибридов.

В комбинации 34045 × ЗСК-4 кривая распределения частот гибрида характеризуется левосторонней асимметрией ( $As = -0,32$ ), а степень доминирования ( $hp = 0,31$ ) указывает на частичное доминирование большего значения признака (рис. 7).

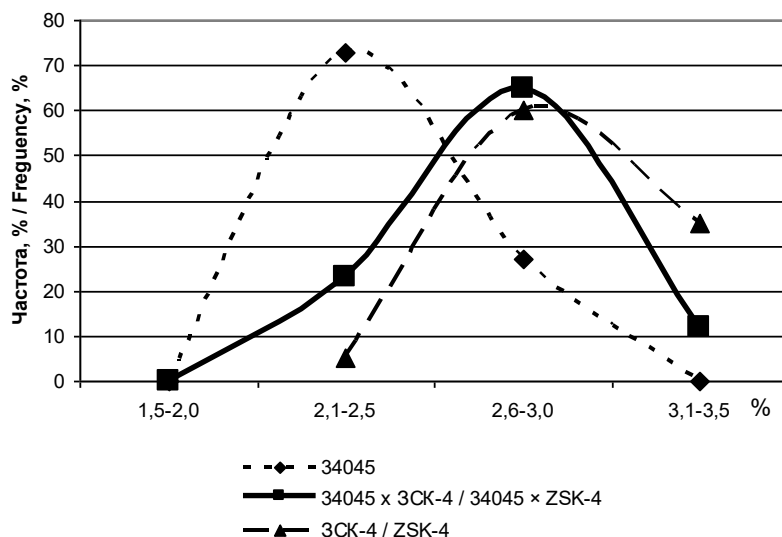


Рис. 7. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  34045 × ЗСК-4 /

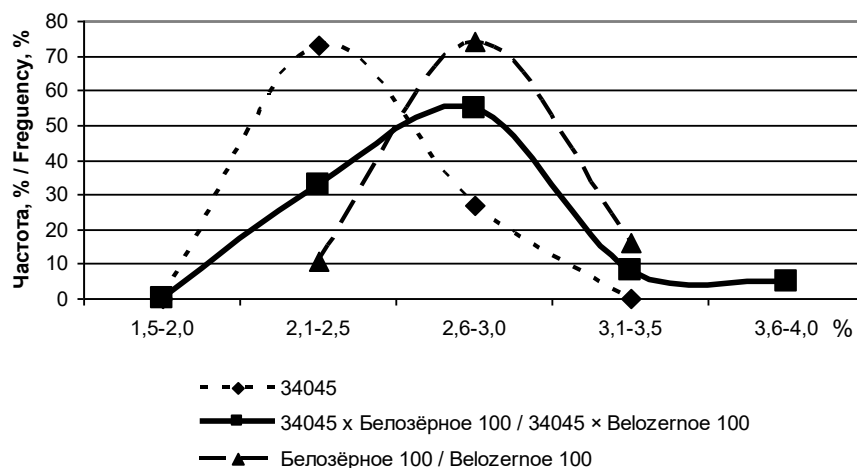
Fig. 7. Frequency distribution of the trait 'lysine percentage' in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  34045 × ZSK-4

Сопоставление крайних частот гибрида и частот исходных форм выявило отличие между родительскими образцами по одной паре генов, т. к. расщепление происходило в соот-

ношении 1:3. Родительские формы различались по аллелям гена А, поэтому скрещивание было типа aabbсс × AAbbсс. Сила действия гена А во втором блоке скрещивания равна 0,47 %.

Анализ распределения частот признака «содержание лизина» в комбинации 34045 × Белозёрное 100 показал идентичные результаты, а КРЧ этого гибрида обладала левосторонней асимметрией ( $As = -0,19$ ) и указывала на неполное доминирование большего значения признака ( $hp = 0,45$ ). Сравнение краевых

частот гибрида и исходных форм показало отличие между родительскими образцами по одной паре генов (расщепление в соотношении 1:3). В результате проведённой гибридизации между образцами 34045 и Белозёрное 100 выделились трансгрессивные формы с содержанием лизина в белке 3,69-3,93 % (рис. 8).

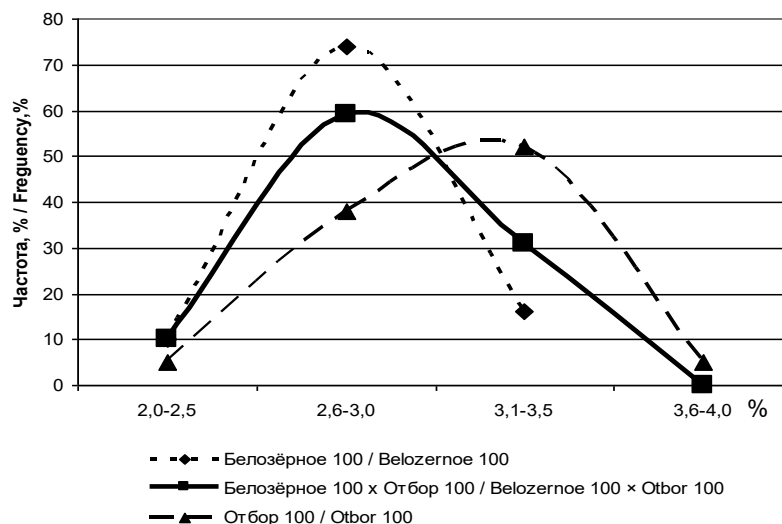


**Рис. 8. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  34045 × Белозёрное 100 /**

**Fig. 8. Frequency distribution of the trait ‘lysine percentage’ in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  34045 × Belozernoe 100**

В комбинации Белозёрное 100 × Отбор 100 кривая распределения частот имела правостороннюю асимметрию ( $As = 0,25$ ), а степень доминирования ( $hp = -0,38$ ) говорит о частичном

доминировании меньшего значения признака. На долю гибрида приходилось 25 % частот родительской формы Отбор 100, что соответствует расщеплению в соотношении 3:1 (рис. 9).



**Рис. 9. КРЧ признака «содержание лизина в белке» зерна сорго у родительских форм и гибрида  $F_2$  Белозёрное 100 × Отбор 100 /**

**Fig. 9. Frequency distribution of the trait ‘lysine percentage’ in sorghum grain of parental forms and hybrid  $F_2$  Belozernoe 100 × Otkor 100**

Моногенные различия отмечены и у гибрида ЗСК-4 × Отбор 100. Тригенные различия имеются между образцами 34045 и Зерно-

градское 204, а также 34045 и 144 ф/8. Они установлены путем сопоставления данных двух блоков диаллельных скрещиваний.

В результате проведённых скрещиваний по двум диаллельным схемам отмечено проявление положительной трансгрессии по признаку «содержание лизина в белке» в прямых и обратных скрещиваниях между образцами Sb-126/4 и СПЗС-11, ЗСК-4 и Отбор 100, а также в комбинациях 34045 х Белозёрное 100 и ЗСК-4 х Белозёрное 100, где в качестве отцовской формы использовали образец Белозёрное 100.

В комбинациях Sb-126/4 × СПЗС-11, Зерноградское 204 × СПЗС-11 для последующей селекционной работы отобраны формы с высоким содержанием лизина в белке зерна сорго (более 3,5 %).

Комплексное обобщение полученных данных позволило составить схему наследования различных уровней содержания лизина в белке (рис. 10).

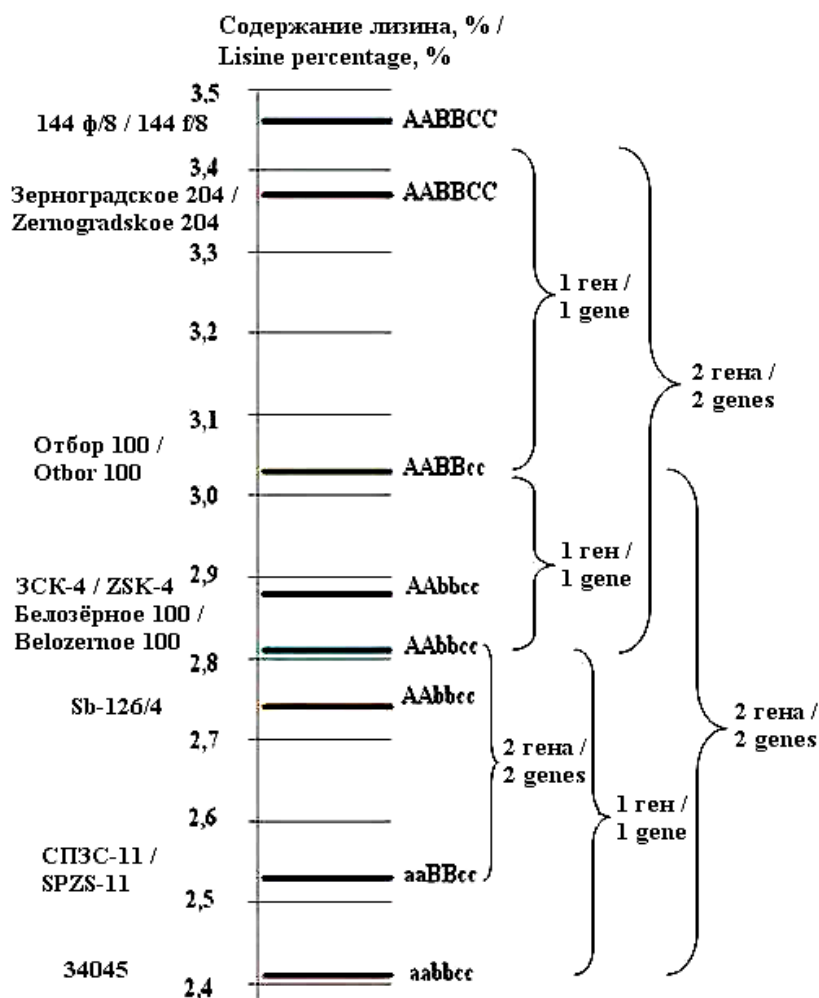


Рис. 10. Генотипические различия родительских форм по «содержанию лизина в белке» зерна сорго /

Fig. 10. Genotypic differences of parental forms in lysine percentage in grain

Таким образом, полученная информация о наследовании признака «содержание лизина в белке» позволит более целенаправленно вести селекционную работу с зерновым сорго на повышение его уровня в новых сортах.

#### Заключение.

1. В проведённых исследованиях по изучению наследования содержания лизина в белке гибридов F<sub>2</sub> между привлечёнными

в гибридизацию 8-ю образцами сорго зернового установлены различия в 1-3 гена.

2. Образцы 144 ф/8 и Зерноградское 204 имели генотип AABBCC, Отбор 100 – AABBcc, ЗСК-4, Белозёрное 100 и Sb-126/4 – AAbbcc, СПЗС-11 – aaBBcc, 34045 – aabbcc.

3. Для проведения дальнейшей селекционной работы отобраны формы с высоким содержанием лизина в белке (более 3,5 %).



*Список литературы*

1. Tesso T., Ejeta G., Chandrashekar A., Huang C., Tandjung A., Lewamy M., Axtell J. D., Hamaker B. R. A Novel Modified Endosperm Texture in a Mutant High-Protein Digestibility/High-Lysine Grain Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Cereal Chem.*, 2006;83(2):194-201. DOI: <https://doi.org/10.1094/CC-83-0194>
2. Taylor J. R. N., Schober T. J., Bean S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *J Cer Sci.*, 2006;(44(3)):252-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>
3. Васильченко С. А., Метлина Г. В., Ковтунов В. В. Влияние метеоусловий на продуктивность сорго зернового в южной зоне Ростовской области. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016;(120):744-754. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26469981>
4. Романюкин А. Е., Шишова Е. А., Ковтунова Н. А., Ермолина Г. М. Признаковая и генетическая коллекция скороспелых форм сахарного сорго. Аграрный вестник Урала. 2016;7(149):46-50. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27191817>
5. Mofokeng A. M., Shimelis H., Laing M. Breeding strategies to improve sorghum quality. *AJCS*. 2017;11(02):142-148. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p127>
6. Ковтунов В. В. Посевная площадь и урожайность сорго зернового. Зерновое хозяйство России. 2018;(3):47-49. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-57-3-47-49>
7. Шепель Н. А. Селекция и семеноводство гибридного сорго. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1985. 256 с.
8. Шепель Н. А. Сорго. Волгоград: Комитет по печати, 1994. 448 с.
9. Ferreira R. R., Meinhardt L. W., Azevedo R. A. Lysine and threonine biosynthesis in sorghum seeds: Characterization of aspartate kinase and homoserine dehydrogenase isoenzymes. *Ann Appl Biol*. 2006;149(1):77-86. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00074.x>
10. Wu Y., Yuan L., Guo X., Holding D. R., Messing J. Mutation in the seed storage protein kafirin creates a high-value food trait in sorghum. *Nat Commun*. 2013;(4):2217. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms3217>
11. Лушпина О. А., Сухенко Н. Н., Ковтунов В. В. Коллекционный материал сорго зернового для селекции на продуктивность. Зерновое хозяйство России. 2016;(3): 13-16. Режим доступа: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/163>
12. Singh R., Axtell J. D. High lysine mutant gene (hl) that improves protein quality and biological value of grain sorghum. *Crop Sci*. 1973;13(5):535-539. URL: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2135/cropsci1973.0011183X001300050012x>
13. Fano D. Breeding of sorghum for high lysine in the seed. *International Journal of Agriculture Sciences*. 2017;9(43):4702-4707. URL: <http://www.researchgate.net/publication/327384832>
14. Fantaye B. M. Genetic improvement of lysine content in sorghum: A Review. *J. Advan. Plant Sci.*, 2018;1(3):307. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329191838>
15. Oria M. P., Hamaker B. R., Axtell J. D., Huang C. P. A highly digestible sorghum mutant cultivar exhibits a unique folded structure of endosperm protein bodies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000;97(10):5065-5070. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.080076297>

*References*

1. Tesso T., Ejeta G., Chandrashekar A., Huang C., Tandjung A., Lewamy M., Axtell J. D., Hamaker B. R. A Novel Modified Endosperm Texture in a Mutant High-Protein Digestibility/High-Lysine Grain Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Cereal Chem.*, 2006;83(2):194-201. DOI: <https://doi.org/10.1094/CC-83-0194>
2. Taylor J. R. N., Schober T. J., Bean S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *J Cer Sci.*, 2006;(44(3)):252-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>
3. Vasil'chenko S. A., Metlina G. V., Kovtunov V. V. *Vliyaniye meteoussloviy na produktivnost' sorgo zernovogo v yuzhnoy zone Rostovskoy oblasti*. [The effect of weather conditions on grain sorghum productivity in the southern zone of the Rostov region]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2016;(120):744-754. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26469981>
4. Romanyukin A. E., Shishova E. A., Kovtunova N. A., Ermolina G. M. *Priznakovaya i geneticheskaya kolleksiya skorospelykh form sakharного sorgo*. [Trait and genetic collection of the early maturing forms of sweet sorghum]. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2016;7(149):46-50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27191817>
5. Mofokeng A. M., Shimelis H., Laing M. Breeding strategies to improve sorghum quality. *AJCS*. 2017;11(02):142-148. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p127>
6. Kovtunov V. V. *Posevnaya ploshchad' i urozhaynost' sorgo zernovogo*. [Sown area and productivity of grain sorghum]. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2018;(3):47-49. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-57-3-47-49>
7. Shepel' N. A. *Seleksiya i semenovodstvo gibridnogo sorgo*. [Breeding and seed production of hybrid sorghum]. *Rostov-on-Don: Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta*, 1985. 256 p.
8. Shepel' N. A. *Sorgo*. [Sorghum]. *Volgograd: Komitet po pechati*, 1994. 448 p.
9. Ferreira R. R., Meinhardt L. W., Azevedo R. A. Lysine and threonine biosynthesis in sorghum seeds: Characterization of aspartate kinase and homoserine dehydrogenase isoenzymes. *Ann Appl Biol*. 2006;149(1):77-86. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00074.x>

10. Wu Y., Yuan L., Guo X., Holding D. R., Messing J. Mutation in the seed storage protein kafirin creates a high-value food trait in sorghum. *Nat Commun.* 2013;(4):2217. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms3217>
11. Lushpina O. A., Sukhenko N. N., Kovtunov V. V. *Kollektsionnyy material sorgo zernovogo dlya selektsii na produktivnost'*. [The collection material of grain sorghum for the selection on productivity]. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2016;(3):13-16. (In Russ.). URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/163>
12. Singh R., Axtell J. D. High lysine mutant gene (hl) that improves protein quality and biological value of grain sorghum. *Crop Sci.* 1973;13(5):535-539.  
URL: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2135/cropsci1973.0011183X001300050012x>
13. Fano D. Breeding of sorghum for high lysine in the seed. *International Journal of Agriculture Sciences.* 2017;9(43):4702-4707. URL: <http://www.researchgate.net/publication/327384832>
14. Fantaye B. M. Genetic improvement of lysine content in sorghum: A Review. *J. Advan. Plant Sci.*, 2018;1(3):307. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329191838>
15. Oria M. P., Hamaker B. R., Axtel J. D., Huang C. P. A highly digestible sorghum mutant cultivar exhibits a unique folded structure of endosperm protein bodies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000;97(10):5065-5070. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.080076297>

**Сведения об авторах**

**Алабушев Андрей Васильевич**, академик РАН, доктор с.-х. наук, профессор, директор, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, д. 3, Зерноградский район, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8675-1021>

✉ **Ковтунов Владимир Викторович**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства сорго зернового, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, д. 3, Зерноградский район, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7510-7705>, e-mail: [kowtunow85@mail.ru](mailto:kowtunow85@mail.ru)

**Костылев Павел Иванович**, доктор с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства риса, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, д. 3, Зерноградский район, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4371-6848>

**Ковтунова Наталья Александровна**, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства сорго кормового, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, д. 3, Зерноградский район, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0409-5855>

**Кравченко Нина Станиславовна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимической оценки селекционного материала и качества зерна, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, д.3, Зерноградский район, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

**Information about authors**

**Andrey V. Alabushev**, academician of RAS, Doctor of Agricultural Sciences, professor, director of Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Zernogradsky district, Rostov region, Russian Federation, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8675-1021>

✉ **Vladimir V. Kovtunov**, PhD in Agricultural science, leading researcher, the Laboratory of Grain Sorghum Breeding and Seed Production, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Zernogradsky district, Rostov region, Russian Federation, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7510-7705>, e-mail: [kowtunow85@mail.ru](mailto:kowtunow85@mail.ru)

**Pavel I. Kostylev**, Doctor of Agricultural Science, professor, chief researcher, the Laboratory of Rice Breeding and Seed Production, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Zernogradsky district, Rostov region, Russian Federation, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4371-6848>

**Nataliya A. Kovtunova**, PhD in Agricultural science, leading researcher, the Laboratory of Forage Sorghum Breeding and Seed Production, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Zernogradsky district, Rostov region, Russian Federation, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0409-5855>

**Nina S. Kravchenko**, PhD in Biological science, senior researcher, the Laboratory of Biochemical Estimation of Breeding Material and Seed Quality, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Zernogradsky district, Rostov region, Russian Federation, 347740, e-mail: [vniizk30@mail.ru](mailto:vniizk30@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

✉ – Для контактов / Corresponding author