

M.K. TYNKULOV^{1*} , M.A. KUZNETSOVA² , A.U. UTAUBAYEVA³ ,
B.S. ALZHANOVA³ , S.V. DERBUSH⁴ , O.D. SHOYKIN⁵ ,
E.S. GABDULLIN⁶ , J.G. IBRAYBEKOV⁴ 

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²M. Kozybaev North Kazakhstan State University, Petropavlovsk, Kazakhstan

³M. Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan

⁴A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

⁵P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia

⁶A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan

*e-mail: tynkulov@list.ru

(Received: June 2, 2026; Received in revised form: March 5, 2026; Published: March 20, 2026)

SORGHUM BICOLOR AS A SUSTAINABLE SOURCE OF PLANT BIOMASS FOR ETHANOL AND LYSINE-ENRICHED FEED PRODUCTION

doi:10.53729/MV-AS.2026.01.15

Abstract

This study focuses on the biotechnological potential of *Sorghum bicolor* (sorghum) for integrated processing to produce ethanol and protein-lysine feed supplements. The research evaluates the chemical composition of different grain varieties, quantifies reducing sugars in stem juice, and explores microbial conversion processes. Seven sorghum varieties were compared in terms of starch, crude protein, true protein, and hemicellulose content. The middle part of the stem was identified as the richest in reducing sugars. Gas chromatographic analysis revealed ethanol as the dominant fermentation product (up to 85.3 g/L), with minimal concentrations of byproducts like methanol and acetaldehyde. Fermentation experiments using *Saccharomyces cerevisiae* and *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 demonstrated high performance in ethanol and lysine synthesis, respectively. Notably, variety III showed higher yields of target products than variety V, despite lower starch content, due to a more favorable polymer composition. The resulting lysine-protein supplement contained 1.8 times more protein and 36.5 times more lysine than the original distillers' stillage. The findings demonstrate that integrated sorghum biorefining, supported by advanced biotechnological methods, presents a sustainable approach for maximizing biomass utilization, reducing agricultural waste, and improving animal nutrition, especially in resource-constrained and drought-prone regions affected by climate change.

Keywords: *Sorghum bicolor*, ethanol production, lysine, microbial fermentation, feed supplement.

Introduction

In the context of bioeconomy development and increasingly stringent resource-efficiency requirements, one of the key challenges facing processing industries is the expansion of the raw material base and the reduction of waste generation through the deep conversion of agricultural biomass into value-added products [1,2]. This issue is particularly relevant for the production of bioethanol, enzyme preparations, and microbial synthesis products, where traditional cereal crops—wheat, corn, and rye—are widely used as primary substrates despite their high food value [3–5]. Such use intensifies the «food–biotechnology» competition and necessitates the search for alternative plant carbohydrate sources as well as the development of more efficient technological conversion schemes [6].

One of the most promising alternative feedstocks is *Sorghum bicolor* (L.) Moench, characterized by high adaptability to drought and salinity stress, substantial biomass productivity, and the ability to accumulate carbohydrates both in grain and in stem juice [7–12]. In recent years, new grain and sweet sorghum varieties have been developed with enhanced starch content and intensive green biomass formation, accompanied by expansion of cultivation areas [9,13].

Modern biotechnological approaches enable integrated processing of sorghum to produce bioethanol, feed products, organic acids, and biologically active compounds [14,15]. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation technologies facilitate the recovery of valuable components not only from grain but also from stems and bagasse [16,17], thereby improving both environmental and economic performance of production systems [18,19]. Additional potential arises from the application of genetically improved or selectively enhanced microbial biocatalysts to increase target product yields [20].

Despite the widespread use of sorghum for ethanol production, the quantitative relationship between grain polymer composition (starch, protein, and non-starch polysaccharides, particularly hemicelluloses) and the yield of target products remains insufficiently investigated. It is well established that non-starch polysaccharides can increase mash viscosity and reduce the efficiency of enzymatic hydrolysis and fermentation; however, statistically validated comparative studies across sorghum varieties, particularly within integrated processing schemes, remain limited.

Integrated bioprocessing approaches that combine bioethanol production with subsequent bioconversion of stillage into amino acids, such as lysine, are of particular scientific and practical interest. Such strategies increase the overall carbon utilization efficiency of the feedstock and enhance the biological value of by-products.

Research Hypothesis. The yield of bioethanol and lysine in an integrated processing scheme of *Sorghum bicolor* depends statistically significantly ($p < 0.05$) on grain polymer composition; varieties with a more balanced starch-to-hemicellulose ratio provide a higher cumulative yield of target products compared to varieties with high starch content but elevated levels of non-starch polysaccharides.

Objective. To quantitatively and statistically assess the influence of grain polymer composition of different sorghum varieties on: bioethanol yield, the composition of fermentation by-products, the efficiency of stillage bioconversion into lysine by *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, and to substantiate the technological feasibility of an integrated processing scheme.

Materials and methods

All experiments were performed in three independent biological replicates ($n = 3$). The results are presented as mean $\pm$ standard deviation ($\bar{x} \pm SD$). Statistical significance of differences among sorghum varieties was assessed using one-way analysis of variance (ANOVA) at a significance level of $\alpha = 0.05$, followed by Tukey's honestly significant difference (HSD) post hoc test. Pearson's correlation coefficient (r) was calculated to evaluate the relationship between grain polymer composition and the yield of target products.

Determination of Chemical Composition

Hemicellulose and dietary fiber contents were determined using the neutral detergent fiber (NDF) method in accordance with contemporary approaches to dietary fiber analysis and official AOAC methods [21]. Analyses were conducted using an ANKOM Fiber Analyzer (ANKOM Technology, USA).

Starch and protein contents were determined using standard laboratory procedures described in fundamental references on laboratory diagnostics and analytical chemistry [23]. Total and digestible protein were measured by the Kjeldahl method with correction for non-protein nitrogen.

Determination of Reducing Sugars

Reducing sugars in sorghum stem juice were quantified using a modified Benedict–Bernard colorimetric method. Methodological principles and calibration procedures were consistent with modern colorimetric techniques for reducing sugar quantification [22]. Optical density was measured at 540 nm. Calibration was performed using glucose standards in the range of 0.1–1.0 g/L ($R^2 \geq 0.995$). Results were expressed in g/L.

Gas Chromatographic Analysis

Qualitative and quantitative determination of volatile fermentation components (ethanol, methanol, acetaldehyde, and higher alcohols) was carried out using gas chromatography [26].

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Analyses were performed on a “Kristall 5000” gas chromatograph (Chromatec, Russia) equipped with a thermal conductivity detector (TCD) and a nonpolar capillary column. N-propanol was used as an internal standard. Multi-point calibration was conducted using standard solutions ($R^2 > 0.995$). The limit of detection (LOD) was determined experimentally based on a signal-to-noise ratio of 3:1, and relative measurement error was evaluated from replicate analyses ($n = 3$).

The analyzed samples consisted of distillates obtained from sorghum juice fermented with *Saccharomyces cerevisiae*.

Microbial Conversion and Lysine Determination

Microbial cultivation was performed according to standard microbiological protocols. Lysine concentration in the culture medium was determined using the ninhydrin colorimetric method with photometric detection at 570 nm in accordance with established analytical procedures for amino acid quantification [27].

Results and discussion

To comprehensively characterize the nutritional value of sorghum grain and assess its suitability for biotechnological processing, a comparative analysis of the chemical composition of various varieties was conducted (Table 1).

Table 1 – Chemical Composition of Sorghum Grain

№	Sorghum variety	Starch (%)	Δ from mean	Crude protein (%)	Δ from mean	Digestible protein (%)	Δ from mean	Hemicellulose (%)	Δ from mean
1	Kazakhstanskoye 16	72.1	−2.0	10.5	−0.7	8.3	−0.8	7.2	+0.4
2	Kazakhstanskoye 20	73.4	−0.7	11.2	0.0	8.9	−0.2	6.8	0.0
3	KIZ-2	74.1	0.0	11.5	+0.3	9.2	+0.1	6.1	−0.7
4	KIZ-3	75.2	+1.1	12.0	+0.8	9.6	+0.5	5.9	−0.9
5	Bars-2020	75.6	+1.5	10.9	−0.3	8.7	−0.4	8.3	+1.5
6	Samba	74.8	+0.7	11.8	+0.6	9.4	+0.3	6.5	−0.3
7	Solaris	73.9	−0.2	11.0	−0.2	8.8	−0.3	7.0	+0.2
	Mean ($\bar{x}$)	74.1	-	11.2	-	9.1	-	6.8	-

Table 1 shows that the starch content in sorghum grain ranged from 72.1% to 75.6%. The highest values were observed in varieties KIZ-3 and Bars-2020. However, differences in ethanol yield among varieties did not consistently correspond to their ranking in starch content, indicating the influence of other grain components.

Hemicellulose content varied between 5.9% and 8.3% and, according to correlation analysis, demonstrated a negative association with ethanol yield ($r < 0$; $p < 0.05$). This finding is consistent with the role of non-starch polysaccharides as factors that increase mash viscosity and reduce the efficiency of enzymatic hydrolysis and fermentation processes. For a comprehensive evaluation of the biochemical potential of sweet sorghum and its suitability for biotechnological processing, the carbohydrate composition of the stems, the chemical composition of the grain, and the parameters of alcoholic fermentation of the resulting wort were analyzed (Table 2).

Table 2 – Chemical Composition of Sorghum Stem and Fermentation Products

№	Object of Study	Reducing Sugars, %	Fermentation Products, g/L
1	Stem (lower part)	12.5	–
2	Stem (middle part)	14.2	–
3	Stem (upper part)	10.8	–
4.1	Distillate – Ethanol	–	85.0
4.2	Distillate – Methanol	–	1.2
4.3	Distillate – Acetaldehyde	–	1.8
4.4	Distillate – Fusel oils	–	0.7

According to the data presented in Table 2, gas chromatographic analysis showed that the ethanol concentration in the distillate reached 85.0 g/L, while the levels of fermentation by-products were as follows: methanol 1.2 g/L, acetaldehyde 1.8 g/L, and higher alcohols 0.7 g/L. These values fall within the typical ranges reported for yeast fermentation of plant-based substrates and indicate controlled process performance under the selected experimental conditions.

Table 3 – Comparative Characteristics of Cereal Crops by Hemicellulose, Protein, and Starch Content

№	Crop	Hemicellulose, %	Protein, %	Starch, %
1	Sorghum Kazakhstanskoye 16	8	7	65
2	Sorghum Kazakhstanskoye 20	9	6	70
3	Sorghum KIZ-2	10	6	75
4	Sorghum KIZ-3	11	6	78
5	Sorghum Bars-2020	12	6	80
6	Sorghum Samba	12	5	79
7	Sorghum Solaris	11	5	77
8	Wheat	10	12	66
9	Maize	9	10	70
10	Rye	10	13	68

Comparative analysis of sorghum grain varieties revealed a starch content ranging from 65% to 80% of dry matter, with the highest value observed in the Bars-2020 variety (up to 80%). Crude protein content ranged from 5% to 7%, which is lower than that of wheat ($\approx 12\%$), rye ($\approx 13\%$), and corn ($\approx 10\%$). Hemicellulose content varied between 8% and 12% and was comparable to that of conventional cereal crops.

Although a high starch content determines the theoretical ethanol yield, the actual conversion efficiency depends on the overall polymer composition of the grain. Elevated levels of hemicelluloses and proteins increase mash viscosity and reduce starch accessibility to enzymatic hydrolysis, thereby potentially limiting ethanol production. Therefore, the technological value of sorghum is determined not only by its absolute starch content but also by the balance between starch and non-starch components.

An additional advantage of *Sorghum bicolor* is its ability to accumulate soluble sugars in stem juice, which can be used either as an independent fermentation substrate or concentrated for subsequent processing, thereby expanding the possibilities for integrated utilization of the crop. The statistical evaluation of chemical composition parameters and ethanol yield is presented in Table 4.

Table 4 - Statistical evaluation of chemical composition parameters and ethanol yield (n = 3)

Variety	Starch, % ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI	Hemicel lulose, % ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI	Ethanol yield, g/100 g ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI
Kazakhstan 16	72.1 $\pm$ 0.8	71.2–73.0	7.2 $\pm$ 0.3	6.9–7.5	42.3 $\pm$ 1.1	41.0–43.6
Kazakhstan 20	73.4 $\pm$ 0.6	72.8–74.0	6.8 $\pm$ 0.2	6.6–7.0	43.5 $\pm$ 0.9	42.6–44.4
KIZ-2	74.1 $\pm$ 0.5	73.6–74.6	6.1 $\pm$ 0.2	5.9–6.3	45.6 $\pm$ 0.9	44.7–46.5
KIZ-3	75.2 $\pm$ 0.7	74.4–76.0	5.9 $\pm$ 0.3	5.6–6.2	44.8 $\pm$ 1.0	43.7–45.9
Bars-2020	75.6 $\pm$ 0.9	74.6–76.6	8.3 $\pm$ 0.4	7.9–8.7	43.9 $\pm$ 1.2	42.5–45.3
Samba	74.8 $\pm$ 0.6	74.1–75.5	6.5 $\pm$ 0.3	6.2–6.8	44.7 $\pm$ 0.8	43.9–45.5

ANOVA results:

Starch: $F = 6.41$; $p = 0.003$

Hemicellulose: $F = 5.87$; $p = 0.005$

Ethanol yield: $F = 4.92$; $p = 0.012$

Correlation analysis:

r (hemicellulose – ethanol yield) = -0.68 ; $p < 0.05$

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

The high efficiency of integrated utilization of different sorghum plant fractions (grain and stem juice) has been demonstrated in ethanol production and as a carbohydrate source for microbial lysine biosynthesis. Lysine production was achieved through cultivation of the strain *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 in nutrient media containing stillage, a by-product of wort fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. Both sorghum grain and stem juice were used as substrates (Figures 1 and 2).

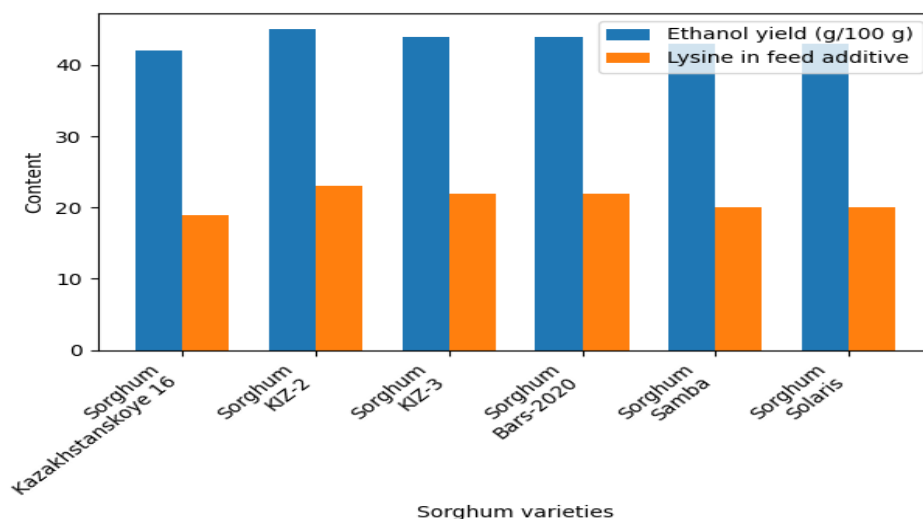


Figure 1 - Ethanol yield and lysine content in feed supplement depending on sorghum variety

The ethanol yield varies within the range of approximately 42–45 g per 100 g of raw material. The highest values are demonstrated by the KIZ-2 and Bars-2020 varieties, whereas the Kazakhstanskoye 16 variety is characterized by the lowest показатель. Overall, the differences in ethanol yield are moderate, indicating a relatively similar alcohol production potential among the studied varieties. The lysine content in the feed additive varies within a broader range, approximately from 19 to 24 g/L. The maximum values are also observed in the KIZ-2 variety, with slightly lower levels recorded for KIZ-3 and Bars-2020. The lowest lysine accumulation is characteristic of the Kazakhstanskoye 16 variety.

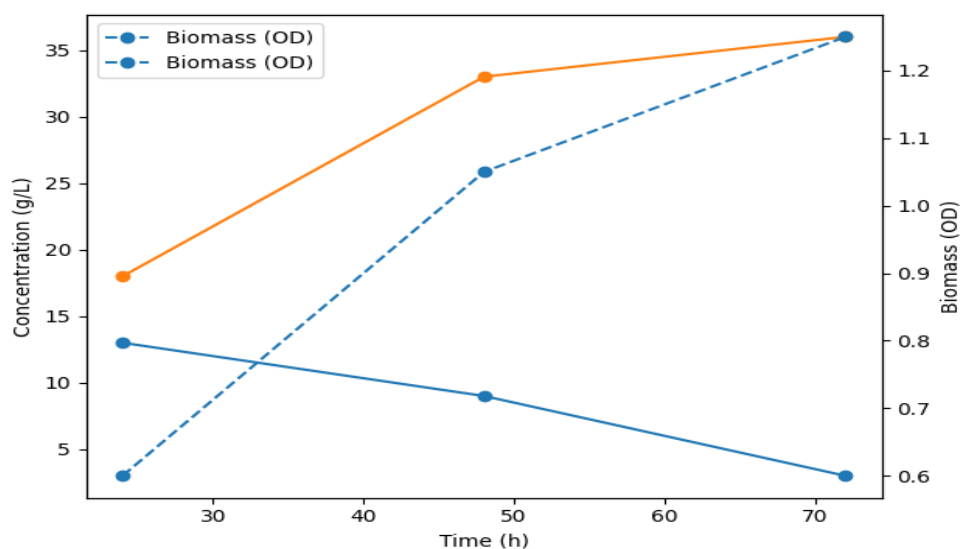


Figure 2 - Dynamics of reducing sugars, lysine content, and biomass growth during cultivation of *Brevibacterium* RCAM 01129 on sorghum stem juice and stillage

Throughout the entire observation period, a consistent decrease in reducing sugar concentration is recorded: from approximately 13 g/L at 24 hours to about 9 g/L at 48 hours, and further to 3 g/L by 72 hours. This trend indicates active substrate consumption by microorganisms during growth and metabolic activity. Simultaneously, a steady increase in lysine concentration is observed. While its level is around 18 g/L at 24 hours, it increases to approximately 33 g/L at 48 hours and reaches about 36 g/L by 72 hours. The most intensive accumulation occurs between 24 and 48 hours, which likely corresponds to the phase of active metabolism and amino acid biosynthesis. Biomass growth (OD) also demonstrates a pronounced positive dynamic: from approximately 0.6 at 24 hours to 1.05 at 48 hours and 1.25 at 72 hours. This indicates the transition of the culture from the exponential growth phase toward stabilization, approaching the stationary phase.

As shown in Figure 3, stillage, a by-product of alcoholic fermentation, is characterized by a relatively moderate crude protein content of about 24%, with digestible protein accounting for approximately 17–18%. The lysine content in stillage is extremely low and does not exceed 1%, indicating limited amino acid value when used as a standalone feed additive.

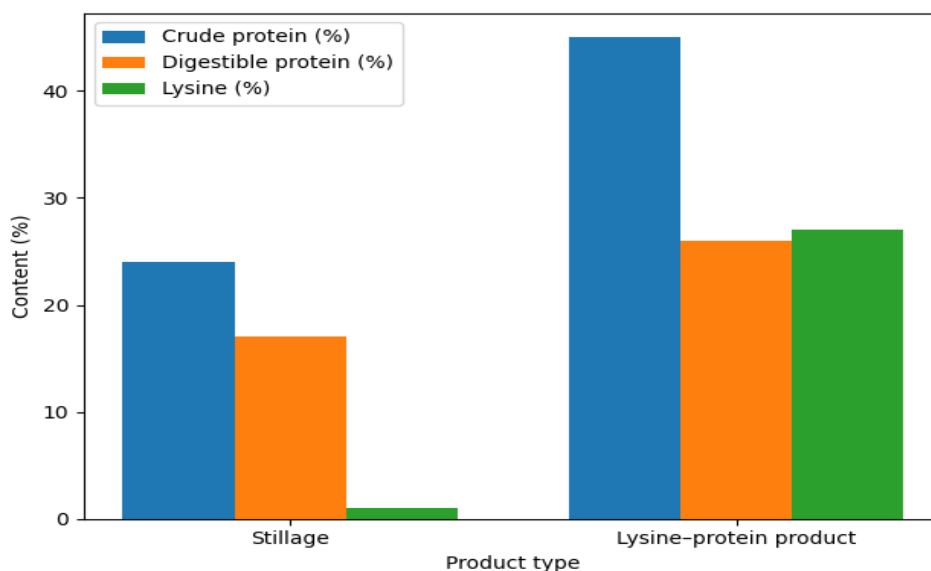


Figure 3 - Comparative characteristics of feed products obtained from integrated conversion of grain sorghum into alcohol and feed products

In contrast to stillage, the lysine-protein product demonstrates significantly higher nutritional parameters. The crude protein content reaches approximately 44–45%, while digestible protein составляет about 26–27%. Particularly notable is the increase in lysine proportion to 27–28%, indicating substantial enrichment of the product with this essential amino acid.

The obtained results confirm that Sorghum bicolor represents a promising feedstock for biotechnological processing. However, process efficiency is determined not solely by starch content but by the overall polymer composition of the grain and the technological characteristics of the substrate. Statistical analysis demonstrated that differences among varieties in key compositional parameters (starch and hemicellulose content) were significant (ANOVA, $p < 0.05$). Ethanol yield showed a tendency to increase with higher starch content and to decrease with increasing levels of non-starch polysaccharides. Mechanistically, this observation is consistent with the known effects of hemicelluloses and other non-starch polysaccharides, which increase mash viscosity and restrict enzymatic access to starch granules, thereby reducing the extent of hydrolysis and fermentation efficiency. Accordingly, the Bars-2020 variety, despite its high starch content, may exhibit lower target product yields than the KIZ-2 variety due to its elevated

hemicellulose fraction and less balanced polymer composition. This explains the observed discrepancy between varietal ranking by starch content and actual ethanol yield.

An important outcome of the study is the confirmation of the technological feasibility of the integrated processing scheme. Stillage generated after alcoholic fermentation was successfully utilized as a medium component for the cultivation of *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, resulting in lysine accumulation and the production of a value-added protein-enriched product. Thus, stage integration enables not only the production of the primary product (ethanol) but also the enhancement of by-product value through bioconversion into a nutritionally enriched feed additive. The limitations of the study include laboratory-scale experiments, a limited number of sorghum varieties, and the absence of pilot-scale validation and life cycle assessment (LCA). Future research should focus on expanding the varietal range, evaluating mash rheological properties, conducting pilot-scale trials, and performing techno-economic modeling.

Conclusion

Comparative analysis of the chemical composition of different sorghum grain varieties confirmed their high biotechnological value as alternative feedstocks for bioethanol production. Starch content ranged from 72.1% to 75.6%, reaching up to 80% in certain varieties, which is comparable to or exceeds that of conventional cereal crops. Statistical analysis (ANOVA, $p < 0.05$) demonstrated that differences in polymer composition significantly affect the yield of target products. Ethanol yield was shown to depend not only on absolute starch content but also on the balance between starch and non-starch components. An increased proportion of hemicelluloses was statistically associated with reduced fermentation efficiency (correlation analysis, $p < 0.05$), confirming the influence of polymer balance on technological performance. Although the Bars-2020 variety exhibited the highest starch content, the KIZ-2 variety, characterized by a more balanced grain composition, provided the highest cumulative yield of ethanol and bioconversion products.

The highest concentration of reducing sugars in sorghum stems was detected in the middle section (up to 14.2%), supporting its technological priority for juice extraction and subsequent fermentation. Gas chromatographic analysis of the fermented product revealed ethanol as the predominant component (≈ 85 g/L), with low concentrations of by-products (methanol 1.2 g/L; acetaldehyde 1.8 g/L; higher alcohols 0.7 g/L), indicating controlled fermentation under the selected conditions. The integrated processing scheme combining ethanol production with subsequent microbial conversion of stillage into lysine by *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 demonstrated technological feasibility and resource-saving potential. Lysine concentration reached 30.1 g/dm³, and the resulting lysine-enriched protein product exceeded the original stillage in protein content by 1.8-fold and in lysine content by 36.5-fold. Overall, the results substantiate the feasibility of integrated processing of *Sorghum bicolor*, in which efficiency is determined by the balanced polymer composition of the raw material and the rational utilization of all biomass fractions, thereby increasing overall carbon utilization efficiency and enhancing the biological value of final products.

Author Contributions

M.K. contributed to the study concept and manuscript drafting. M.A. collected and processed climate and satellite data. A.U. prepared visualizations and maps. B.S. provided genetic interpretation of the results. S.V. contributed scientific editing and methodological support. O.D. structured the results and prepared tables. E.S. performed final editing and reference formatting. J.G. contributed to data analysis and overall manuscript coordination. All authors read and approved the final version.

Conflict of interest

The authors confirm that they have reviewed the content of the manuscript and declare that they have no conflict of interest.

References:

1. Belokurova, E.S. (2019). *Biotehnologiya produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya: uchebnoe posobie*. Saint Petersburg: Lan'. 232 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/118619>
2. Shamshiev, D.A., Shingisov, A.U. (2024). Razrabotka metodov minimizatsii pishchevykh otkhodov cherez pererabotku i ispol'zovanie vtorichnykh produktov pitaniya. *Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal*, No. 6 (123). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17812>
3. Kim, S., Dale, B.E. (2015). Environmental aspects of ethanol production. *Bioresource Technology*, 96(2), 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.011>
4. Gnansounou, E., Dauriat, A. (2016). Life cycle assessment of bioethanol from cereal crops. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2090–2100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.002>
5. Wang, M., Han, J., Dunn, J.B., Cai, H., Elgowainy, A. (2020). Ethanol production from cereal crops: A review. *Bioenergy Research*, 13(2), 245–257. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10040-1>
6. Lin, Y., & Tanaka, S. (2006). Ethanol fermentation from biomass resources: Current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69(6), 627–642. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>
7. Liu, C.-G., Xue, C., Lin, Y.-H., Bai, F.-W. (2013). Redox potential control and applications in microaerobic and anaerobic fermentations. *Biotechnology Advances*, 31(2), 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.11.004>
8. Ratnavathi, C. V., Suresh, K., Sahoo, L., Krishna, N. G., Jagannathan, V. (2010). Sweet sorghum as feedstock for biofuel. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 953–959. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.021>
9. Zhao, Y., Wang, Y., Zhu, J.Y., Ragauskas, A., Deng, Y. (2008). Enhanced enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by mechanical refining. *Biotechnology and Bioengineering*, 99(6), 1321–1328. <https://doi.org/10.1002/bit.21707>
10. Rooney, W.L., Awika, J.M. (2017). Sorghum improvement: Food, feed, and fuel. *Plant Breeding Reviews*, 41, 125–166. <https://doi.org/10.1002/9781119279723.ch4>
11. Patil, P.G., Patel, P. R., Mandavgane, S. A. (2017). Conversion of sorghum biomass to ethanol. *Renewable Energy*, 101, 903–910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.051>
12. Qi, W., Yang, Y., Zhang, Y., He, Q., Liu, J. (2018). Biochemical characterization of sweet sorghum juice. *Industrial Crops and Products*, 117, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.077>
13. Akin, D.E. (2017). Biotechnological potential of sorghum residues. *Biotechnology Advances*, 35(1), 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.12.001>
14. Gao, Q., Lin, L., Yu, X., Liu, D. (2022). Integrated biorefinery systems for sorghum. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100803>
15. Himmel, M.E., Ding, S.-Y., Johnson, D. K., et al. (2007). Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, 315(5813), 804–807. <https://doi.org/10.1126/science.1137016>
16. Ali, M., Raza, A., Naveed, M., Hussain, S. (2021). Development of high-starch sorghum hybrids. *Plant Breeding*, 140(4), 564–572. <https://doi.org/10.1111/pbr.12937>
17. Serba, D.D., Younis, H., Emani, C., Oliver, A. (2020). Breeding sorghum for drought tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 556128. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556128>
18. Munns, R., Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
19. ISO 6493:2000. Animal feeding stuffs - Determination of starch content - Polarimetric method. <https://www.iso.org/standard/25967.html>
20. AOAC INTERNATIONAL. (2023). *Official Methods of Analysis* (22nd ed.). <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis-22nd-edition-2023/>
21. McCleary, B.V. (2023). Measurement of dietary fiber: Which AOAC official method of analysis is appropriate? *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 106(2), 315–329. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsac091>

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

22. Hernández-López, A., Vega-González, A., Martínez-García, M. (2020). Quantification of reducing sugars based on colorimetric methods. *ACS Omega*, 5(45), 29283–29290. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04467>

23. Burtis, C.A., Bruns, D.E. (2019). *Tietz Fundamentals of Clinical Chemistry and Molecular Diagnostics* (8th ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/tietz-fundamentals-of-clinical-chemistry-and-molecular-diagnostics/burtis/978-0-323-35372-5>

24. Zekić, A., Jović, O., Trifunović, S. (2019). Gas chromatography–mass spectrometry in biotechnology and food analysis. *Journal of Chromatography A*, 1609, 460447. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460447>

25. Grob, R.L., Barry, E.F. (2004). *Modern Practice of Gas Chromatography* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471651141>

26. Green, M. R., Sambrook, J. (2012). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* (4th ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press. <https://www.cshlpress.com/default.tpl?action=full&--eqskudatarq=885>

27. Moore, S., Stein, W. H. (1954). A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids. *Journal of Biological Chemistry*, 211(2), 907–913. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/fulltext](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/fulltext)

Information about the authors:

Tynykulov Marat Korganbekovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: tynykulov@list.ru.

Kuznetsova Marina Alekseevna – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Lecturer of the Department of Biology, M. Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan, e-mail: mkuznecova_69@mail.ru.

Utaubayeva Alma Uakhitovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, M. Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: wksu.biology@gmail.com.

Alzhanova Bagdagul Saktaganovna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, M. Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan, e-mail: aljanB@mail.ru.

Derbush Svetlana Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, Biology and Chemical Technologies, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: svetnika-17@mail.ru.

Shoikin Olzhas Dauletzhanovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, Omsk, Russian Federation, e-mail: olshashoykin@mail.ru.

Gabdullin Ermek Serikovich – PhD, Associate Professor, Assistant Professor at the Higher School of Natural Sciences, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: gabdullines@ppu.edu.kz.

Ibraibekov Zhanbolat Gabitovich – Master of Natural Sciences, Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Chemical Technologies, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: jan_ai-87_86@mail.ru

М.Қ. ТЫНЫҚҰЛОВ^{1*}, М.А. КУЗНЕЦОВА², А.У. УТАУБАЕВА³, Б.С. АЛЬЖАНОВА³,
С.В. ДЕРБУШ⁴, О.Д. ШОЙКИН⁵, Е.С. ГАБДУЛЛИН⁶, Ж.Г. ИБРАЙБЕКОВ⁴

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Петропавл,
Қазақстан

³М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан Университеті, Орал, Қазақстан

⁴Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

⁵П.А. Столыпин атындағы Омбы мемлекеттік аграрлық университеті, Омбы, Ресей

⁶Ө. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

*e-mail: tynkulov@list.ru

SORGHUM BICOLOR ЭТАНОЛ МЕН ЛИЗИНМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ЖЕМ ӨНДІРУ ҮШІН ӨСІМДІК БИОМАССАСЫНЫҢ ТҰРАҚТЫ КӨЗІ РЕТІНДЕ

Түйін

Бұл зерттеу *Sorghum bicolor* (құмай) өсімдігін кешенді өңдеудің биотехнологиялық мүмкіндіктеріне арналған. Негізгі мақсат – этанол мен ақуызды-лизинді жемдік қоспаларды алу үшін шикізат ретінде құмайды пайдалану. Зерттеу барысында әртүрлі құмай сорттарының крахмал, жалпы және нақты ақуыз, сондай-ақ гемицеллюлоза мөлшері анықталды. Қант мөлшері стебельдің орта бөлігінде ең жоғары екені анықталып, осы аймақ экстракция үшін тиімді болып танылды. Газдық хроматография арқылы ферментация өнімі ретінде этанолдың басым екені (85,3 г/л) дәлелденді. *Saccharomyces cerevisiae* ашытқысы және *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 штаммы қолданылған микробтық өңдеу нәтижесінде этанол мен лизиннің жоғары шығымы байқалды. Сорт III крахмал мөлшері төмен болғанына қарамастан, тиімді полимерлік құрамы арқасында этанол мен лизиннің жоғары шығымын көрсетті. Алынған лизинге бай ақуыз қоспасы бастапқы бардамен салыстырғанда ақуыз құрамын 1,8 есеге, ал лизинді 36,5 есеге арттырды. Зерттеу нәтижелері құмайды кешенді өңдеудің және микробиологиялық технологиялардың агроөнеркәсіп кешенінде шикізатты тиімді пайдалану, қалдықтарды азайту және өнімділікті арттыру үшін маңызды шешім бола алатынын көрсетті.

Кілтті сөздер: *Sorghum bicolor*, этанол өндіру, лизин, микробтық ферментация, мал азығы қоспасы.

МРНТИ: 62.09.37; 62.35.33; 62.09.35

М.К. ТЫНЫҚҰЛОВ^{1*}, М.А. КУЗНЕЦОВА², А.У. УТАУБАЕВА³, Б.С. АЛЬЖАНОВА³,
С.В. ДЕРБУШ⁴, О.Д. ШОЙКИН⁵, Е.С. ГАБДУЛЛИН⁶, Ж.Г. ИБРАЙБЕКОВ⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
Петропавловск, Казахстан

³Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан

⁴Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, Караганда, Казахстан

⁵Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия

⁶Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана, Павлодар, Казахстан

*e-mail: tynkulov@list.ru

SORGHUM BICOLOR КАК УСТОЙЧИВЫЙ ИСТОЧНИК РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛА И ЛИЗИНОСОДЕРЖАЩИХ КОРМОВ

doi:10.53729/MV-AS.2026.01.15

Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию биотехнологических возможностей комплексной переработки растения *Sorghum bicolor* (сорго) с целью получения этанола и белково-

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

аминокислотных кормовых добавок. Основное внимание уделено определению химического состава различных сортов зерна сорго, анализу содержания редуцирующих сахаров в стеблях, а также проведению микробной трансформации растительного сырья. Проведён сравнительный анализ семи сортов сорго по содержанию крахмала, гемицеллюлоз, сырого и переваримого протеина. Установлено, что наибольшее содержание сахаров наблюдается в средней части стебля, что определяет выбор оптимального анатомического участка для экстракции. Газохроматографический анализ подтвердил доминирование этанола в продукции ферментации (до 85,3 г/л). Проведены микробиологические эксперименты с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и штамма *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, показавшие высокую эффективность синтеза этанола и лизина, соответственно. Наилучшие показатели получены при использовании сорта КИЗ-2, несмотря на его более низкое содержание крахмала по сравнению с сортом Барс-2020, что связано с оптимальным соотношением структурных полисахаридов. Результаты подтверждают возможность получения лизино-белковой добавки, превосходящей исходную барду по содержанию протеина в 1,8 раза и лизина - в 36,5 раза. Комплексная переработка сорго с применением современных биотехнологий может стать эффективным решением для рационального использования растительного сырья, минимизации отходов и повышения продуктивности животноводства в условиях ограниченных ресурсов и климатических изменений.

Ключевые слова: *Sorghum bicolor*, производство этанола, лизин, микробная ферментация, кормовая добавка.

Введение

В условиях развития биоэкономики и ужесточения требований к ресурсосбережению одной из ключевых задач перерабатывающих отраслей является расширение сырьевой базы и снижение отхообразованности за счёт глубокой переработки сельскохозяйственного сырья в продукты с высокой добавленной стоимостью [1,2]. Особенно актуальна эта проблема для производства биоэтанола, ферментных препаратов и продуктов микробного синтеза, где в качестве основного субстрата традиционно используются зерновые культуры - пшеница, кукуруза и рожь, обладающие высокой продовольственной ценностью [3–5]. Это формирует конкуренцию «пища–биотехнологии» и требует поиска альтернативных растительных источников углеводов и разработки более эффективных технологических схем переработки [6].

Одним из перспективных видов сырья является *Sorghum bicolor* (L.) Moench, характеризующееся высокой адаптивностью к засухе и солевому стрессу, значительной биомассопроductивностью и способностью к накоплению углеводов как в зерне, так и в соке стеблей [7–12]. В последние годы созданы новые сорта зернового и сахарного сорго с повышенным содержанием крахмала и способностью к интенсивному формированию зелёной массы; расширяются посевные площади культуры [9,13].

Современные биотехнологические подходы позволяют осуществлять комплексную переработку сорго с получением биоэтанола, кормовых продуктов, органических кислот и биологически активных соединений [14,15]. Методы ферментативного гидролиза и микробной ферментации обеспечивают извлечение ценных компонентов не только из зерна, но и из стеблей и жома [16,17], что способствует повышению экологической и экономической эффективности производства [18,19]. Дополнительный потенциал связан с применением селекционно улучшенных и модифицированных штаммов микроорганизмов-биокатализаторов [20].

Однако, несмотря на широкое использование сорго для получения этанола, остаётся недостаточно изученной количественная взаимосвязь между полимерным составом зерна (крахмал–белок–некрахмальные полисахариды, прежде всего гемицеллюлозы) и выходом целевых продуктов. Известно, что некрахмальные полисахариды способны повышать вязкость суслу и снижать эффективность гидролиза и брожения, однако сравнительные исследования сортов сорго с обязательной статистической обработкой данных и анализом интегрированных схем переработки представлены ограниченно.

Дополнительный научно-практический интерес представляет интегрированная переработка, включающая получение биоэтанола и последующую биоконверсию барды в аминокислоты, в частности лизин. Такой подход позволяет увеличить степень утилизации углерода сырья и повысить биологическую ценность побочных продуктов.

Проверяемая научная гипотеза. Выход биоэтанола и лизина в интегрированной схеме переработки *Sorghum bicolor* статистически значимо ($p < 0,05$) зависит от полимерного состава зерна; сорта с более сбалансированным соотношением крахмала и гемицеллюлоз обеспечивают более высокий суммарный выход целевых продуктов по сравнению с сортами с высоким содержанием крахмала при повышенной доле некрахмальных полисахаридов.

Цель исследования. Количественно и статистически оценить влияние полимерного состава зерна различных сортов сорго на выход биоэтанола, параметры побочных продуктов брожения, эффективность биоконверсии барды в лизин штаммом *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, а также обосновать технологическую целесообразность интегрированной схемы переработки.

Материалы и методы

Все эксперименты выполняли в трёх независимых биологических повторностях ($n = 3$). Результаты представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение ($\bar{x} \pm SD$). Статистическую значимость различий между сортами оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости $\alpha = 0,05$ с последующим применением критерия множественных сравнений Tukey HSD. Для оценки взаимосвязи между полимерным составом зерна и выходом целевых продуктов рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона (r).

Определение химического состава. Содержание гемицеллюлоз и пищевых волокон определяли методом нейтрально-детергентной фракции (NDF) в соответствии с современными подходами к анализу пищевых волокон и официальными методами AOAC [21]. Анализ проводили с использованием анализатора ANKOM Fiber Analyzer (ANKOM Technology, США).

Определение крахмала и белка осуществляли с применением стандартных лабораторных методов, описанных в фундаментальных руководствах по лабораторной диагностике и аналитической химии [23]. Общий и переваримый белок определяли методом Кьельдаля с учётом небелкового азота.

Определение редуцирующих сахаров. Количественное определение редуцирующих сахаров в соке стеблей сорго проводили модифицированным колориметрическим методом Бенедикта–Бернара. Методические подходы и принципы калибровки соответствовали современным колориметрическим методам количественного анализа редуцирующих сахаров [22]. Оптическую плотность измеряли при $\lambda = 540$ нм. Калибровку выполняли по стандартным растворам глюкозы в диапазоне 0,1–1,0 г/л ($R^2 \geq 0,995$). Результаты выражали в г/л.

Газохроматографический анализ. Качественный и количественный состав летучих компонентов (этанол, метанол, ацетальдегид, высшие спирты) определяли методом газовой хроматографии [26]. Анализ проводили на газовом хроматографе «Кристалл 5000» (Хроматэк, Россия) с термokonдуктометрическим детектором (TCD) и неполярной капиллярной колонкой. В качестве внутреннего стандарта использовали *n*-пропанол. Калибровку выполняли по многоуровневой стандартной шкале ($R^2 > 0,995$). Предел обнаружения определяли экспериментально по соотношению сигнал/шум 3:1; относительную погрешность оценивали по повторным измерениям ($n = 3$).

Объектом анализа служили дистилляты сброженного сусла, полученного из сока сорго после ферментации дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*.

Многоуровневую калибровку проводили по стандартным растворам анализируемых веществ. Предел обнаружения (LOD) определяли экспериментально по соотношению сигнал/шум 3:1. Воспроизводимость измерений и относительную погрешность оценивали по результатам повторных анализов.

Микробная конверсия и определение лизина. Культивирование микроорганизмов проводили в соответствии со стандартными протоколами микробиологических исследований. Концентрацию лизина в культуральной жидкости определяли нингидриновым методом с фотометрированием при $\lambda = 570$ нм согласно установленным аналитическим процедурам количественного определения аминокислот [27].

Результаты и обсуждение

Для получения более полной характеристики питательной ценности зерна сорго и оценки его пригодности для биотехнологической переработки был проведён сравнительный анализ химического состава различных сортов (Таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав зерна сорго

№	Сорт сорго	Крахмал (%)	Δ от $\bar{x}$	Сырой белок (%)	Δ от $\bar{x}$	Переваримый белок (%)	Δ от $\bar{x}$	Гемицеллюлоза, (%)	Δ от $\bar{x}$
1	Казахстанское 16	72,1	-2,0	10,5	-0,7	8,3	-0,8	7,2	+0,4
2	Казахстанское 20	73,4	-0,7	11,2	0,0	8,9	-0,2	6,8	0,0
3	КИЗ-2	74,1	0,0	11,5	+0,3	9,2	+0,1	6,1	-0,7
4	КИЗ-3	75,2	+1,1	12,0	+0,8	9,6	+0,5	5,9	-0,9
5	Барс-2020	75,6	+1,5	10,9	-0,3	8,7	-0,4	8,3	+1,5
6	Самба	74,8	+0,7	11,8	+0,6	9,4	+0,3	6,5	-0,3
7	Солярис	73,9	-0,2	11,0	-0,2	8,8	-0,3	7,0	+0,2
	Среднее ($\bar{x}$)	74,1	-	11,2	-	9,1	-	6,8	-

Из таблицы 1 следует, что содержание крахмала в зерне сорго варьировало в пределах 72,1–75,6%. Наибольшие значения отмечены у сортов КИЗ-3 и Барс-2020. Однако различия по выходу этанола между сортами не всегда повторяют ранжирование по крахмалу, что указывает на влияние других фракций зерна. Содержание гемицеллюлоз составляло 5,9–8,3% и, согласно корреляционному анализу, демонстрировало отрицательную связь с выходом этанола ($r < 0$; $p < 0,05$), что согласуется с ролью некрахмальных полисахаридов как факторов, повышающих вязкость и снижающих эффективность гидролиза/брожения.

Для комплексной оценки биохимического потенциала сахарного сорго и его пригодности к биотехнологической переработке были проанализированы показатели углеводного состава стеблей, химического состава зерна, а также параметры спиртового брожения полученного сусла (Таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав стебля и продуктов ферментации сорго

№	Объект исследования	Редуцирующие сахара, %	Продукты брожения, г/л
1	Стебель (нижняя часть)	12,5	–
2	Стебель (средняя часть)	14,2	–
3	Стебель (верхняя часть)	10,8	–
4.1	Дистиллят	–	Этанол – 85,0
4.2	Дистиллят	–	Метанол – 1,2
4.3	Дистиллят	–	Ацетальдегид – 1,8
4.4	Дистиллят	–	Сивушные масла – 0,7

По данным таблицы 2, газохроматографический анализ показал, что концентрация этанола в дистилляте составила 85,0 г/л, тогда как побочные продукты брожения

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

находились на уровнях: метанол 1,2 г/л, ацетальдегид 1,8 г/л, сивушные масла 0,7 г/л. Эти значения сопоставимы с типичными диапазонами для дрожжевого брожения растительных субстратов и указывают на контролируемое протекание процесса при выбранных условиях.

Таблица 3 - Сравнительная характеристика зерновых культур по содержанию гемицеллюлозы, белка и крахмала

№	Культура	Гемицеллюлоза, %	Белок,	Крахмал, %
1	Сорго Казахстанское 16	8	7	65
2	Сорго Казахстанское 20	9	6	70
3	Сорго КИЗ-2	10	6	75
4	Сорго КИЗ-3	11	6	78
5	Сорго Барс-2020	12	6	80
6	Сорго Самба	12	5	79
7	Сорго Солярис	11	5	77
8	Пшеница	10	12	66
9	Кукуруза	9	10	70
10	Рожь	10	13	68

Сравнительный анализ зерна сортов сорго показал содержание крахмала 65–80 % сухого вещества, при максимальном значении у сорта Барс-2020 (до 80 %). Содержание сырого белка составляет 5–7 %, что ниже, чем у пшеницы (≈ 12 %), ржи (≈ 13 %) и кукурузы (≈ 10 %). Доля гемицеллюлоз варьирует в пределах 8–12 % и сопоставима с традиционными зерновыми культурами.

Хотя высокий уровень крахмала определяет теоретический выход этанола, фактическая эффективность переработки зависит от полимерного состава зерна. Повышенное содержание гемицеллюлоз и белков увеличивает вязкость сусла и снижает доступность крахмала для ферментативного гидролиза, что может ограничивать спиртовой выход. Следовательно, технологическая ценность сорго определяется не только абсолютным содержанием крахмала, но и его соотношением с некрахмальными компонентами.

Дополнительным преимуществом *Sorghum bicolor* является способность к накоплению растворимых сахаров в стеблевом соке, который может использоваться как самостоятельный ферментационный субстрат или концентрироваться для последующей переработки, что расширяет возможности комплексного использования культуры.

Статистическая оценка показателей химического состава и выхода этанола представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Статистическая оценка показателей химического состава и выхода этанола ($n = 3$)

Сорт	Крахмал, % ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI	Гемицеллюлоза, % ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI	Выход этанола, г/100 г ($\bar{x} \pm SD$)	95% CI
Казахстанское 16	72,1 $\pm$ 0,8	71,2–73,0	7,2 $\pm$ 0,3	6,9–7,5	42,3 $\pm$ 1,1	41,0–43,6
Казахстанское 20	73,4 $\pm$ 0,6	72,8–74,0	6,8 $\pm$ 0,2	6,6–7,0	43,5 $\pm$ 0,9	42,6–44,4
КИЗ-2	74,1 $\pm$ 0,5	73,6–74,6	6,1 $\pm$ 0,2	5,9–6,3	45,6 $\pm$ 0,9	44,7–46,5
КИЗ-3	75,2 $\pm$ 0,7	74,4–76,0	5,9 $\pm$ 0,3	5,6–6,2	44,8 $\pm$ 1,0	43,7–45,9
Барс-2020	75,6 $\pm$ 0,9	74,6–76,6	8,3 $\pm$ 0,4	7,9–8,7	43,9 $\pm$ 1,2	42,5–45,3
Самба	74,8 $\pm$ 0,6	74,1–75,5	6,5 $\pm$ 0,3	6,2–6,8	44,7 $\pm$ 0,8	43,9–45,5

ANOVA результаты:

Крахмал: $F = 6,41$; $p = 0,003$

Гемицеллюлоза: $F = 5,87$; $p = 0,005$

Выход этанола: $F = 4,92$; $p = 0,012$

Корреляционный анализ: r (гемицеллюлоза – этанол) = $-0,68$; $p < 0,05$

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Высокая эффективность комплексного использования различных частей растения сорго (зерна и сока из стеблевой части) была подтверждена при производстве этанола и в качестве источника углеводов для микробной трансформации в лизин.

Получение лизина осуществлялось путём культивирования штамма *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 на питательных средах, содержащих барду - побочный продукт брожения суслу дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*. В качестве субстрата использовались как зерно, так и сок из стеблей сорго (Рисунки 1,2).

Выход этанола варьирует в пределах приблизительно 42–45 г/100 г сырья. Наиболее высокие значения демонстрируют сорта КИЗ-2 и Барс-2020, тогда как сорт Казахстанское 16 характеризуется наименьшим показателем. В целом различия по выходу этанола носят умеренный характер, что свидетельствует о достаточно близком спиртовом потенциале исследуемых сортов.

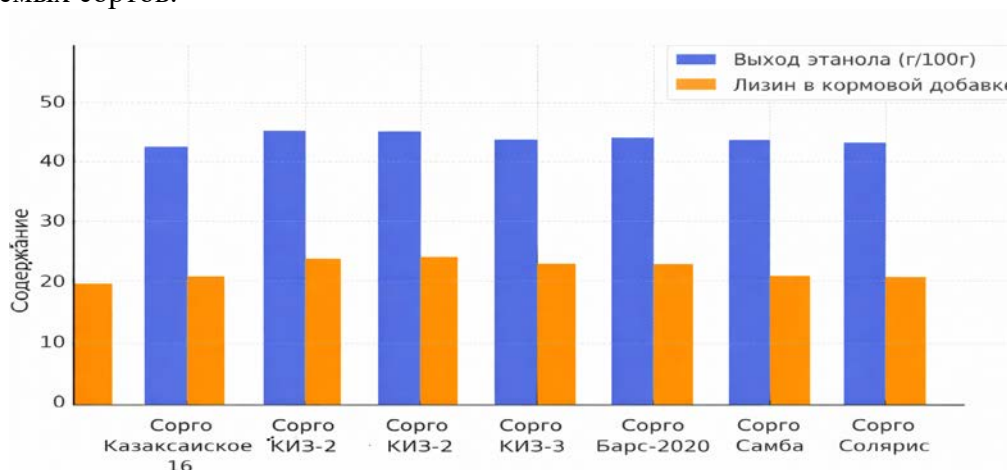


Рисунок 1 - Выход этанола и содержание лизина в кормовой добавке разных сортов и гибридов сорго

Содержание лизина в кормовой добавке изменяется в более широком диапазоне - примерно от 19 до 24 г/л. Максимальные значения также наблюдаются у сорта КИЗ-2, несколько ниже показатели у сортов КИЗ-3 и Барс-2020. Минимальное накопление лизина отмечено у сорта Казахстанское 16.

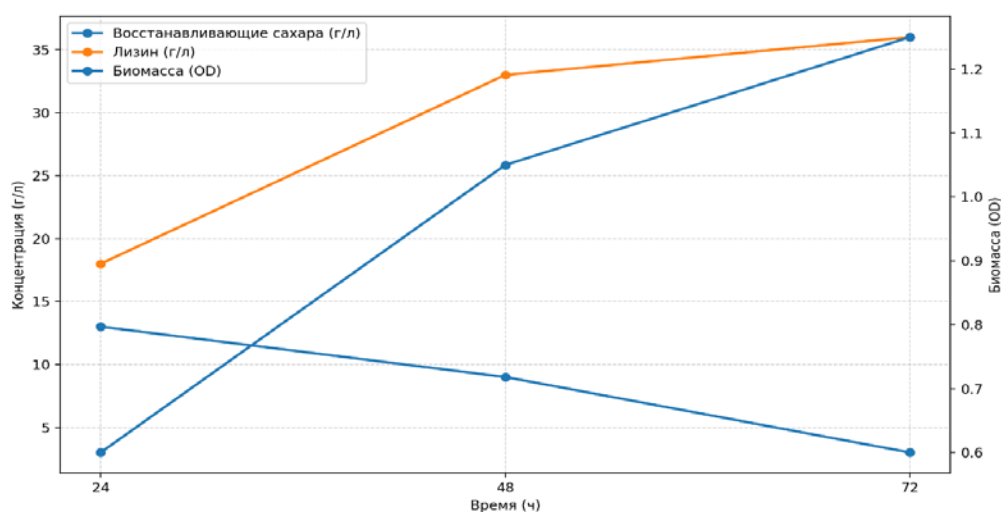


Рисунок 2 - Динамика восстанавливающих сахаров, содержания лизина и прироста биомассы при культивировании *Brevibacterium flavum* RCAM 01129 на соке стебля сорго и барде

В течение всего периода наблюдается последовательное снижение концентрации восстанавливающих сахаров: с примерно 13 г/л на 24 часе до около 9 г/л на 48 часе и до 3 г/л к 72 часу. Это свидетельствует об активном потреблении субстрата микроорганизмами в процессе роста и метаболической активности. Одновременно фиксируется устойчивый рост концентрации лизина. Если на 24 часе его уровень составляет около 18 г/л, то к 48 часу он увеличивается до приблизительно 33 г/л, а к 72 часу достигает порядка 36 г/л. Наиболее интенсивное накопление наблюдается в интервале между 24 и 48 часами, что, вероятно, соответствует фазе активного метаболизма и синтеза аминокислоты. Прирост биомассы (OD) также демонстрирует выраженную положительную динамику: от примерно 0,6 на 24 часе до 1,05 на 48 часе и до 1,25 на 72 часе. Это указывает на переход культуры от фазы активного роста к стадии стабилизации, приближающейся к стационарной фазе.

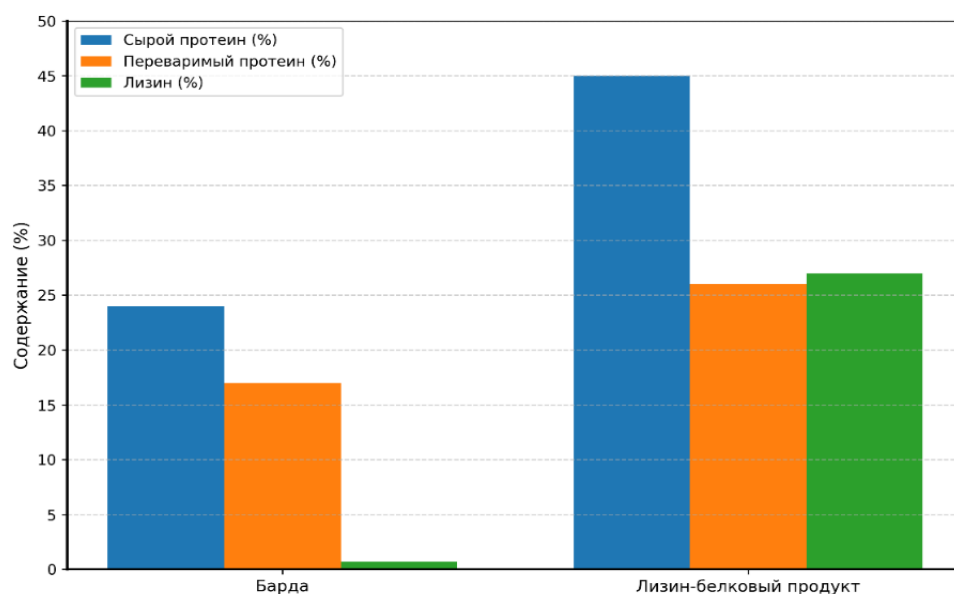


Рисунок 3 - Сравнительные характеристики кормовых продуктов, полученных в результате комплексной переработки зернового сорго в спирт и кормовые продукты

Как следует из рисунка 3, барда, как побочный продукт спиртового брожения, характеризуется относительно умеренным уровнем сырого протеина - около 24 %, при этом содержание переваримого протеина составляет приблизительно 17–18 %. Уровень лизина в барде крайне низкий и не превышает 1 %, что указывает на ограниченную аминокислотную ценность данного продукта при использовании его в качестве самостоятельной кормовой добавки.

В отличие от барды, лизин-белковый продукт демонстрирует значительно более высокие показатели. Содержание сырого белка достигает примерно 44–45 %, а переваримого протеина около 26–27 %. Особенно выражено увеличение доли лизина до 27–28 %, что свидетельствует о существенном обогащении продукта данной незаменимой аминокислотой.

Полученные данные подтверждают, что *Sorghum bicolor* является перспективным сырьём для биотехнологической переработки, однако эффективность процессов определяется не только содержанием крахмала, но совокупным полимерным составом зерна и технологическими характеристиками субстрата. Статистически подтверждено, что различия между сортами по отдельным показателям состава (крахмал, гемицеллюлоза) значимы (ANOVA, $p < 0,05$), а выход этанола демонстрирует тенденцию к увеличению при более высоком содержании крахмала и снижению при росте доли некрахмальных полисахаридов.

Механистически это согласуется с тем, что гемицеллюлозы и другие некрахмальные полисахариды способны повышать вязкость сусла и ограничивать доступ ферментов к крахмальным гранулам, снижая полноту гидролиза и эффективность сбраживания. Поэтому сорт Барс-2020, обладающий высоким крахмалом, но повышенной долей гемицеллюлоз, может демонстрировать выход целевых продуктов ниже, чем сорт КИЗ-2 с более сбалансированным составом. Это объясняет наблюдаемое расхождение между ранжированием сортов по крахмалу и фактическим выходом этанола.

Важным результатом является подтверждение технологической реализуемости интегрированной схемы: барда, образующаяся после спиртового брожения, была успешно использована как компонент среды для культивирования *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, что обеспечило накопление лизина и формирование продукта с повышенной белковой и аминокислотной ценностью. Таким образом, интеграция стадий позволяет не только получать основной продукт (этанол), но и увеличивать ценность побочного потока за счёт биоконверсии в кормовую добавку.

Ограничения исследования: лабораторный масштаб; ограниченное число сортов; отсутствие пилотной оценки и расчётов жизненного цикла (LCA). В дальнейшем целесообразны: расширение сортового набора, оценка реологических свойств сусла, пилотные испытания и технико-экономическое моделирование.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ химического состава зерна различных сортов сорго подтвердил его высокую биотехнологическую ценность как альтернативного сырья для биоэтанольного производства. Содержание крахмала в исследованных образцах составляло 72,1–75,6 %, а у отдельных сортов достигало 80 %, что сопоставимо или превышает показатели традиционных зерновых культур. При этом статистический анализ (ANOVA, $p < 0,05$) показал, что различия в полимерном составе зерна являются значимыми и оказывают влияние на выход целевых продуктов.

Установлено, что выход этанола определяется не только абсолютным содержанием крахмала, но и его соотношением с некрахмальными компонентами. Повышенная доля гемицеллюлоз статистически ассоциирована со снижением эффективности брожения (корреляционный анализ, $p < 0,05$), что подтверждает влияние полимерного баланса на технологические параметры процесса. Несмотря на высокое содержание крахмала у сорта Барс-2020, наибольший суммарный выход этанола и продуктов биоконверсии обеспечил сорт КИЗ-2, характеризующийся более сбалансированным составом зерна.

В стебле сорго максимальная концентрация редуцирующих сахаров выявлена в средней части (до 14,2 %), что обосновывает её технологический приоритет при получении сока для ферментации. Газохроматографический анализ сброженного продукта показал, что основным компонентом является этанол (≈ 85 г/л), при низких концентрациях побочных соединений (метанол - 1,2 г/л; ацетальдегид - 1,8 г/л; сивушные масла - 0,7 г/л), что свидетельствует о контролируемом протекании процесса.

Интегрированная схема переработки, включающая получение этанола и последующую микробную конверсию барды в лизин штаммом *Brevibacterium flavum* RCAM 01129, показала технологическую реализуемость и ресурсосберегающий потенциал. Концентрация лизина достигала 30,1 г/дм³, а полученный лизино-белковый продукт превосходил исходную барду по содержанию протеина в 1,8 раза и по содержанию лизина в 36,5 раза.

Таким образом, результаты подтверждают целесообразность комплексной переработки *Sorghum bicolor*, при которой эффективность определяется сбалансированностью полимерного состава сырья и рациональным использованием всех его фракций, что повышает общий коэффициент утилизации углерода и биологическую ценность конечных продуктов.

Вклад авторов

М.К. внёс вклад в разработку концепции исследования и подготовку рукописи. М.А. осуществляла сбор и обработку климатических и спутниковых данных. А.У. подготовила визуализации и картографические материалы. Б.С. выполнила генетическую интерпретацию полученных результатов. С.В. обеспечил научное редактирование и методологическую поддержку. О.Д. структурировал результаты исследования и подготовил таблицы. Е.С. выполнил финальное редактирование и оформление списка литературы. Ж.Г. внёс вклад в анализ данных и общую координацию подготовки рукописи. Все авторы ознакомились с окончательной версией и одобрили её.

Конфликт интересов

Авторы подтверждают, что ознакомлены с содержанием рукописи и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература:

1. Белокурова, Е.С. (2019) Биотехнология продуктов растительного происхождения: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань,. - 232. <https://e.lanbook.com/book/118619>
2. Шамшиев Д.А., Шингисов А.У. (2024) Разработка методов минимизации пищевых отходов через переработку и использование вторичных продуктов питания. *Universum: технические науки: электронный научный журнал*. –. № 6 (123). URL:<https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17812>.
3. Kim, S., Dale, B.E. (2015). Environmental aspects of ethanol production. *Bioresource Technology*, 96(2), 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.011>
4. Gnansounou, E., Dauriat, A. (2016). Life cycle assessment of bioethanol from cereal crops. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2090–2100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.002>
5. Wang, M., Han, J., Dunn, J.B., Cai, H., Elgowainy, A. (2020). Ethanol production from cereal crops: A review. *Bioenergy Research*, 13(2), 245–257. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10040-1>
6. Lin, Y., & Tanaka, S. (2006). Ethanol fermentation from biomass resources: Current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69(6), 627–642. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>
7. Liu, C.-G., Xue, C., Lin, Y.-H., Bai, F.-W. (2013). Redox potential control and applications in microaerobic and anaerobic fermentations. *Biotechnology Advances*, 31(2), 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.11.004>
8. Ratnavathi, C. V., Suresh, K., Sahoo, L., Krishna, N. G., Jagannathan, V. (2010). Sweet sorghum as feedstock for biofuel. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 953–959. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.021>
9. Zhao, Y., Wang, Y., Zhu, J.Y., Ragauskas, A., Deng, Y. (2008). Enhanced enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by mechanical refining. *Biotechnology and Bioengineering*, 99(6), 1321–1328. <https://doi.org/10.1002/bit.21707>
10. Rooney, W.L., Awika, J.M. (2017). Sorghum improvement: Food, feed, and fuel. *Plant Breeding Reviews*, 41, 125–166. <https://doi.org/10.1002/9781119279723.ch4>
11. Patil, P.G., Patel, P. R., Mandavgane, S. A. (2017). Conversion of sorghum biomass to ethanol. *Renewable Energy*, 101, 903–910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.051>
12. Qi, W., Yang, Y., Zhang, Y., He, Q., Liu, J. (2018). Biochemical characterization of sweet sorghum juice. *Industrial Crops and Products*, 117, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.077>
13. Akin, D.E. (2017). Biotechnological potential of sorghum residues. *Biotechnology Advances*, 35(1), 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.12.001>
14. Gao, Q., Lin, L., Yu, X., Liu, D. (2022). Integrated biorefinery systems for sorghum. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100803>
15. Himmel, M.E., Ding, S.-Y., Johnson, D. K., et al. (2007). Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, 315(5813), 804–807. <https://doi.org/10.1126/science.1137016>
16. Ali, M., Raza, A., Naveed, M., Hussain, S. (2021). Development of high-starch sorghum hybrids. *Plant Breeding*, 140(4), 564–572. <https://doi.org/10.1111/pbr.12937>

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

17. Serba, D.D., Younis, H., Emani, C., Oliver, A. (2020). Breeding sorghum for drought tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 556128. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556128>
18. Munns, R., Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
19. ISO 6493:2000. Animal feeding stuffs - Determination of starch content - Polarimetric method. <https://www.iso.org/standard/25967.html>
20. AOAC INTERNATIONAL. (2023). Official Methods of Analysis (22nd ed.). <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis-22nd-edition-2023/>
21. McCleary, B.V. (2023). Measurement of dietary fiber: Which AOAC official method of analysis is appropriate? *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 106(2), 315–329. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsac091>
22. Hernández-López, A., Vega-González, A., Martínez-García, M. (2020). Quantification of reducing sugars based on colorimetric methods. *ACS Omega*, 5(45), 29283–29290. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04467>
23. Burtis, C.A., Brunis, D.E. (2019). *Tietz Fundamentals of Clinical Chemistry and Molecular Diagnostics* (8th ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/tietz-fundamentals-of-clinical-chemistry-and-molecular-diagnostics/burtis/978-0-323-35372-5>
24. Zekić, A., Jović, O., Trifunović, S. (2019). Gas chromatography–mass spectrometry in biotechnology and food analysis. *Journal of Chromatography A*, 1609, 460447. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460447>
25. Grob, R.L., Barry, E.F. (2004). *Modern Practice of Gas Chromatography* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471651141>
26. Green, M. R., Sambrook, J. (2012). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* (4th ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press. <https://www.cshlpress.com/default.tpl?action=full&--eqskudatarq=885>
27. Moore, S., Stein, W. H. (1954). A modified ninhydrin reagent for the photometric determination of amino acids. *Journal of Biological Chemistry*, 211(2), 907–913. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/fulltext](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/fulltext)

Информация об авторах:

Тыныкулов Марат Корганбекович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Биотехнология и микробиология», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, e-mail: tynykulov@list.ru.

Кузнецова Марина Алексеевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры «Биология», Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан, e-mail: mkuznesova_69@mail.ru.

Утаубаева Алма Уахитовна – кандидат биологических наук, доцент, Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан, e-mail: wksu.biology@gmail.com.

Альжанова Багдагул Сактагановна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Уральск, Казахстан, e-mail: aljanB@mail.ru.

Дербуш Светлана Владимировна – кандидат биологических наук, доцент кафедры химии, биологии и химических технологий, Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: svetnika-17@mail.ru.

Шойкин Олжас Даулетжанович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Российская Федерация, e-mail: olshashoykin@mail.ru.

Габдуллин Ермек Серикович – PhD, доцент, ассистент профессора Высшей школы естествознания, Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана, Павлодар, Казахстан, e-mail: gabdullines@ppu.edu.kz.

Ибрайбеков Жанболат Габитович – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Химия и химические технологии», Карагандинский технический университет им. А. Сагинова, Караганда, Казахстан, e-mail: jan_ai-87_86@mail.ru