
Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии

январь – март 2026 №1 (73)

Scientific-theoretical journal

VESTNIK

Of Ulyanovsk State Agricultural Academy

УЧРЕДИТЕЛЬ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
"Ульяновский государственный аграрный
университет имени П.А. Столыпина"

432000, Ульяновская область, г.о. город
Ульяновск, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, зд.1
Тел. 8 (8422)55-95-83

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А.А. Павлушин, д.т.н., профессор, (Ульяновск)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

В.И. Курдюмов, д.т.н., профессор (Ульяновск)

В.А. Исачев, д.с.-х.н., профессор, (Ульяновск)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

М.В. Арисов, д.в.н., профессор (Москва)

А.В. Бушов, д.б.н., профессор (Ульяновск)

В.Г. Васин, д.с.-х.н., профессор (Самара)

А.А. Волков, д.в.н., профессор (Саратов)

Ю.А. Гусева, д.с.-х.н., профессор (Саратов)

В.Г. Захаров, д.с.-х.н., (Ульяновск)

Б.Г. Зиганшин, д.т.н., профессор (Казань)

А. В. Козлов, д.б.н., доцент (Москва)

А.Г. Кошачев, д.б.н., профессор (Краснодар)

А.А. Курочкин, д.т.н., профессор (Пенза)

Е.Н. Кузин, д.с.-х.н., профессор (Пенза)

О.С. Ларионова, д.б.н., доцент (Саратов)

В.И. Максимов, д.б.н., профессор (Москва)

Е.М. Марин, д.в.н. (Ульяновск)

С.М. Надежкин, д.б.н., профессор (Москва)

Р. В. Некрасов, профессор РАН (Подольск)

И.Л. Обухов, д.б.н., профессор (Москва)

Н.В. Пименов, д.б.н., профессор РАН (Москва)

Е.М. Романова, д.б.н., профессор (Ульяновск)

П.В. Сенин, д.т.н., профессор (Саранск)

М.А. Спыну, д.в.н., профессор (Клуж-Напока, Румыния)

А.А. Стекольников, д.в.н., академик РАН (Санкт-Петербург)

С.Ф. Суханова, д.с.-х.н., профессор (Санкт-Петербург)

А.Л. Тойгильдин, д.с.-х.н. (Ульяновск)

Н. М. Троц, д.с.-х.н., профессор (Самара)

А.Л. Хохлов, д.т.н., профессор (Ульяновск)

М. Эйнгор, д.в.н. (Израиль)

И. В. Юдаев, д.т.н., профессор (Краснодар)

П. Мите, доктор (Бад-Лангензальц, Германия)

Д. Трауц, доктор, профессор (Оснабрюк, Германия)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:

Выпускающий редактор

И.С. Раксина

Дизайн, верстка

Д.Н. Хлынов

Корректор

И.А. Нурутдинова

Перевод на английский язык

М.Н. Наумова

ISSN 1816-4501

DOI 10.18286/1816-4501

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор) 13.06.2019 г.
Регистрационный номер ПИ № ФС 77-75896

По решению ВАК РФ журнал входит в **Перечень** ведущих рецен-
зируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты кандидатских
и докторских диссертационных работ.
Издание включено в систему Российского индекса научного ци-
тирования.

Подписано в печать 30.03.2026

Дата выхода в свет 30.03.2026

Формат 70 X108 / 8

Печ. л. 8,0 Усл. п.л.25,0

Тираж 500 экз. Свободная цена



Адрес издателя, редакции, типографии
432000, Ульяновская область, г.о. город
Ульяновск, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, зд.1
Тел. 8 (8422)55-95-83,
e-mail: rid-ugsha@yandex.ru

© ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, 2026

в номере:

**4.1.1. Общее земледелие и растениеводство
(сельскохозяйственные науки)**

Жеряков Е. В., Носов А. В., Семина С. А., Жерякова Ю. И.
Флористический состав и изменение засоренности посевов сахарной
свёклы в зависимости от уровня насыщения севооборота..... 6

Захарова Е. А., Кнурова Г. В., Сафин Р. И., Тойгильдин А. Л.
Метаболические индексы как микробиологические индикаторы
здоровья почв 12

**4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений
(сельскохозяйственные науки)**

Деревянникова М. В., Катков К. А., Чумакова В. В.
Использование комплексного числового показателя для выделения
ценного исходного материала в селекции житняка гребневидного..... 27

Кудрявцева Л. П.
Источники устойчивости к септориозу льна в условиях Северо-Западного
региона..... 35

Налетов И. В., Дуктова Н. А., Заяц В. С.
Применение микроклонального размножения в селекции пшеницы
твёрдой *Triticum durum* Desf. для ускорения селекционного процесса и
сохранения уникального генотипа растений 41

**4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений
(сельскохозяйственные науки)**

Бельченко С. А. Сычев С. М., Моляк Г. П.
Биоэкономический эффект применения пестицидов на агроценозах
яровой пшеницы в условиях серых лесных почв Брянской области 49

Исачев В. А., Андреев Н. Н.
Влияние экзогенных аминокислот и минеральных удобрений на
фитометрические показатели озимой пшеницы 56

Куликова А. Х., Ермолаева Г. В., Волкова Е. С., Асмус Я. А.
Влияние технологий возделывания на свойства чернозема
выщелоченного и урожайность ячменя..... 64

Юрков А. П., Крюков А. А., Никитин С.Н.
Поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для
нужд сельского хозяйства 71

**4.2.1. Патология животных, морфология, физиология, фармакология и
токсикология (ветеринарные науки)**

Козлов С. В., Шелковая А. А., Денисова Н. И., Козлов Е. С.
Изучение фармакотерапевтических свойств препарата на основе
берберина, конъюгированного с наночастицами селена при
индуцированном тетрахлорметаном экспериментальном гепатите у
мышей..... 77

Руденко А.А., Никольская П.С., Луцай В.И.
Исследование гематологических индексов у больных эндокардиозом
собак 84

**4.2.3. Инфекционные болезни и иммунология животных
(ветеринарные науки)**

Племашов К. В., Кузьмин В. А., Орехов Д. А., Щербаков П. П.
Правила нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся
обстановки при вспышках болезней животных 91

4.2.3. Инфекционные болезни и иммунология животных (биологические науки)

Картакаева С. С., Ломакин А. А., Феоктистова Н. А. ВОХ-ПЦР как инструмент для отслеживания патогенных клонов бактерий рода <i>Aeromonas</i> в водных экосистемах	99
Самойленко В. С., Лапина А. А., Подставка С. Д. Оценка функциональной экспрессии цитокинов IL-10 и IL-22 в пробиотических штаммах <i>Lactobacillus spp.</i>	106

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства (сельскохозяйственные науки)

Артемьева О. А., Некрасов Р. В., Солина А. Ю. Использование монокультуры живых дрожжей <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> в кормлении помесных боровков.....	113
Косолапова Е. В. Оценка эффективности комбинированного консервирования <i>Galegi orientalis</i>	120
Наумова В.В. Использование обменной энергии курами кроссов «Родонит» и «Бованс белый» в разные периоды яйцекладки	128
Остренко К. С., Овчарова А. Н., Невкрытая Н. В., Некрасов Р. В. Влияние кориандра посевного и фенхеля обыкновенного на экспрессию генов, ассоциированных с иммунной системой у быков на откорме.....	135

4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные науки)

Криворучко А. Ю., Лиховид Н. Г., Криворучко О. Н., Скокова А. В., Каниболоцкая А. А. Полиморфизмы гена <i>FRY</i> у маньчжурских меринсов, ассоциированные с показателем живой массы в 9 месяцев	142
Вельматов А. П., Тишкина Т. Н. Влияние типа кормления на технологические свойства и аминокислотный состав молока коров красно-пестрой породы.....	151

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

Курочкин А. А., Фролов Д. И. Моделирование и оптимизация воздействия вакуума на степень расширения зернового экструдата	158
Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Имангулов В. Х., Гареев Р. Т. Цифровой двойник пневматической системы посевного комплекса на основе сопряжённого CFD-DEM моделирования	166
Халиуллин Д. Т., Гайфуллин И. Х., Шакиров Р. М. Разработка комбинированного сошника для повышения эффективности бинарных посевов.....	177

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Волхонов М. С., Лебедев С. Г. Определение эффективных параметров предпосевной ультразвуковой обработки семян тимфеевки луговой	184
Самарин Г. Н., Беяков М. В., Ефременков И. Ю. Люминесцентная диагностика молока, загрязненного левофлорксацином.....	191
Юдаев И. В., Даус Ю. В., Кокурин Р. Г., Обоснование структуры установки для электроимпульсной обработки объектов растительного происхождения	199

FOUNDER

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education
"Ulyanovsk State Agrarian University
named after P.A. Stolypin"

432000, Ulyanovsk Region, Ulyanovsk City
Ulyanovsk, Ulyanovsk, Novy Venets Boulevard, building 1
Tel. 8(8422) 55-95-83

EDITOR-IN-CHIEF

A. A. Pavlushin, doctor of technical sciences, professor, (Ulyanovsk)

DEPUTY CHIEF EDITOR

V. I. Kurdyumov, doctor of technical sciences, professor (Ulyanovsk)

V. A. Isaychev, doctor of agricultural sciences, professor, (Ulyanovsk)

EDITORIAL TEAM:

M. V. Arisov, doctor of veterinary sciences, professor (Moscow)

A. V. Bushov, doctor of biological sciences, professor (Ulyanovsk)

V. G. Vasin, doctor of agricultural sciences, professor (Samara)

A. A. Volkov, doctor of biological sciences, professor (Saratov)

Yu. A. Guseva, doctor of agricultural science, professor (Saratov)

V. G. Zakharov, doctor of agricultural sciences (Ulyanovsk)

B. G. Ziganshin, doctor of technical sciences, professor (Kazan)

A. V. Kozlov, doctor of biological sciences, professor

A. G. Koschaev, doctor of biological sciences, professor (Krasnodar)

E. N. Kuzin, doctor of agricultural sciences, professor (Penza)

A. A. Kurochkin, doctor of technical sciences, professor (Penza)

O. S. Larionova, doctor of biological sciences, professor (Saratov)

E. M. Maryin, doctor of veterinary sciences, professor, (Ulyanovsk)

V. I. Maksimov, doctor of biological sciences, professor (Moscow)

S. M. Nadezhkin, doctor of biological sciences, professor (Moscow)

R. V. Nekrasov, Professor of the RAS

I. L. Obukhov, doctor of biological sciences, professor (Moscow)

N. V. Pimenov, doctor of biological sciences, professor of the RAS (Moscow)

E. M. Romanova, doctor of biological sciences, professor (Ulyanovsk)

P. V. Senin, doctor of technical sciences, professor (Saransk)

A. A. Stekolnikov, doctor of veterinary sciences, academician RAS

(Sankt-Petersburg)

M. A. Spinu doctor of veterinary science, professor (Cluj – Napoca, Romania)

S. F. Sukhanova, doctor of agricultural sciences, professor (Sankt-Petersburg)

A. L. Toygildin, doctor of agricultural sciences (Ulyanovsk)

N. M. Trots, doctor of agricultural sciences, professor (Samara)

A. L. Khokhlov doctor of technical sciences, professor (Ulyanovsk)

I. V. Yudaev, doctor of technical sciences, professor (Krasnodar)

M. Einhor, doctor of veterinary sciences (Israel)

P. Miethe, doctor (Germany)

D. Trautz, doctor, professor (Germany)

EDITORIAL STAFF:

Executive editor I. S. Raksina

Design and layout D. N. Khlynov

Corrector I. A. Nurutdinova

English translation M. N. Naumova

ISSN 1816-4501

DOI 10.18286/1816-4501

The edition is registered by Federal service for supervision in the sphere
of communications, information technology and mass communications
13 June 2019. Registration ПИ № ФЦ 77-75896

Signed for printing 30.03.2026

Publication – 30.03.2026

Format 70 x 108/8

Pr. sheet 8,0 Conv. pr. sheet 25,0

Printing 500 iss. Free price



Address of publisher, editorial office, printing house

432000, Ulyanovsk Region, Ulyanovsk City

Ulyanovsk, Ulyanovsk, Novy Venets Boulevard, building 1

Tel. 8 (8422) 55-95-83,

e-mail: rid-ugsha@yandex.ru

© FSBEI HE Ulyanovsk SAU, 2026

contents:

4.1.1. General agriculture and crop production (Agricultural sciences)

Zheryakov E. V., Nosov A. V., Semina S. A., Zheryakova Yu. I.
Floristic composition and changes in weed infestation of sugar beet root
crops depending on the share of this crop in the crop rotation structure 6

Zakharova E. A., Knurova G. V., Safin R. I., Toygildin A. L.
Metabolic indices as microbiological indicators of soil health 12

4.1.2. Plant selection, seed production, and biotechnology (Agricultural sciences)

Derevyannikova M. V., Katkov K. A., Chumakova V. V.
Using a complex numerical indicator to identify valuable source material in
crested wheatgrass breeding 27

Kudryavtseva L. P.
Sources of resistance to flax septoria in the North-Western region 35

Naletov I. V., Duktova N. A., Zayats V. S.
Application of micropropagation in breeding durum wheat *Triticum durum*
Desf. to accelerate the breeding process and preserve the unique genotype
of plant..... 41

4.1.3. Agrochemistry, soil science, plant protection and quarantine (Agricultural sciences)

Belchenko S. A., Sychev S. M., Molyavko G. P.
The bioeconomic effect of using pesticides on spring wheat agrocenoses in
the gray forest soils of the Bryansk region..... 49

Isaychev V. A., Andreev N. N.
The effect of exogenous amino acids and mineral fertilizers on winter wheat
phytometric parameters..... 56

Kulikova A. Kh., Ermolaeva G. V., Volkova E. S., Asmus Ya. A.
The impact of cultivation technologies on the properties of leached black
soil and barley yield 64

Yurkov A. P., Kryukov A. A., Nikitin S. N.
The search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for
agricultural use 71

4.2.1. Animal pathology, morphology, physiology, pharmacology and toxicology (Veterinary sciences)

Kozlov S. V., Shelkovaya A. A., Denisova N. I., Kozlov E. S.
Study of the pharmacotherapeutic properties of a berberine-based
preparation conjugated with selenium nanoparticles in experimental
tetrachloromethane-induced hepatitis in mice..... 77

Rudenko A. A., Nikolskaya P. S., Lutsay V. I.
Study of hematological indices in dogs with endocardiosis 84

4.2.3. Infectious diseases and animal immunology (Veterinary sciences)

Plemyashov K. V., Kuzmin V. A., Orekhov D. A., Shcherbakov P. P.
Rules for mapping the predicted and current situation in case of outbreaks
of animal diseases..... 91

4.2.3. Infectious diseases and animal immunology (Biological sciences)

Kartakaeva S. S., Lomakin A. A., Feoktistova N. A.
BOX-PCR as a tool for tracking pathogenic clones of *Aeromonas* bacteria in
aquatic ecosystems 99

Samoylenko V. S., Lapina A. A., Podstavkina S. D.
Evaluation of the functional expression of il-10 and il-22 cytokines in
probiotics strains of *Lactobacillus spp.*..... 106

4.2.4. Special animal husbandry, feeding, feed production technologies and livestock product manufacturing
(Agricultural sciences)

Artemyeva, O. A., Nekrasov, R. V., Solina, A. Yu. Usage of a monoculture of live yeast <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> in feeding of crossbred young hogs.....	113
Kosolapova, E. V. Evaluation of the efficiency of combined preservation of <i>Galega orientalis</i>	120
Naumova, V. V. The use of metabolic energy by chickens of the «Rhodonite» and «Bovans» White crosses during different periods of egg laying	128
Ostrenko, K. S., Ovcharova, A. N., Nevkrytayya, N. V., Nekrasov, R. V. Effects of coriander and fennel on the expression of genes associated with the immune system in fattening bulls	135

4.2.5. Animal breeding, selection, genetics and biotechnology (agricultural sciences)

Krivoruchko A. Yu., Likhovid N. G., Krivoruchko O. N., Skokova A. V., Kanibolotskaya A. A. Polymorphisms of the FRY gene in Manych merino sheep associated with the live weight indicator at 9 months	142
Velmatov A. P., Tishkina T. N. The impact of feeding type on the technological properties and amino acid composition of milk in red-pied cows	151

4.3.1. Technologies, machines and equipment for agro-industrial complex (Technical sciences)

Kurochkin, A. A., Frolov, D. I. Modeling and improvement of the vacuum effect on the expansion ratio of grain extrudate	158
Mudasirov, S. G., Farkhutdinov, I. M., Imangulov, V. Kh., Gareev, R. T. A digital twin of a seeding complex pneumatic system based on coupled cfd-dem modeling.....	166
Khaliullin, D. T., Gaifullin, I. Kh., Shakirov, R. M. Development of a combined opener to increase the efficiency of binary seeding	177

4.3.2. Electrical Technologies, Electrical Equipment, and Power Supply for the Agro-Industrial Complex (Engineering Sciences)

Volkhonov M. S., Lebedev S. G. Determination of effective parameters of pre-sowing ultrasonic treatment of meadow timothy seeds.....	184
Samarin G. N., Belyakov M. V., Efremenko I. Yu. Luminescent diagnostics of milk contaminated with levofloxacin	191
Yudaev I. V., Daus Yu. V., Kokurin R. G. Justification of the structure of the installation for electric pulse processing of plant origin objects	199

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-6-11

УДК 633.63+632.5

Флористический состав и изменение засоренности посевов сахарной свёклы в зависимости от уровня насыщения севооборота

Е. В. Жеряков[✉], кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Растениеводство и лесное хозяйство»

А. В. Носов, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Финансы и информатизация бизнеса»

С. А. Семина, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Переработка сельскохозяйственной продукции»

Ю. И. Жерякова, кандидат сельскохозяйственных наук, ст. преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и химия»

ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

440014, Пенза, Ботаническая, 30

[✉]zheryakov.e.v@pgau.ru

Резюме. Исследования проводили с целью изучения видового состава и динамики засоренности посевов в зависимости от степени насыщения севооборота сахарной свеклой для дальнейшей разработки агротехнических приемов борьбы с сорняками. Полевые опыты осуществляли на черноземе выщелоченном лесостепи Среднего Поволжья с 2008 по 2017 гг. в полевых 10-польных севооборотах, каждый из которых включает один уровень насыщения (10 %, 20 %, 30 %, 40 % и 50 %). Чередование культур проходило только во времени. Вхождение в полевой севооборот осуществлялось ежегодно одним полем. В 2017 г. закончилась 1-я ротация севооборота. При увеличении уровня насыщения севооборота сахарной свеклой от 10 % до 50 % наблюдается тенденция к снижению общей численности сорных растений в фазе полных всходов. В фазе «полные всходы» в посевах сахарной свёклы больше всего представлен подтип малолетних сорняков – 36,06...51,17 шт./м² в зависимости от уровня насыщения, а преобладающим по численности видом сорной растительности была щирица запрокинутая, количество мари белой было в два-четыре раза меньше. К фазе смыкания листьев в междурядьях отмечено увеличение численности злаковых сорняков, однако их количество значительно (в 3,9...8,1 раза) меньше по сравнению с двудольными. Доля двудольных сорняков увеличивалась с 79,6...81,1 % при уровне насыщения севооборота 10...30 % до 80,9 % до 89,1 % при 40...50 %. К уборке, по сравнению с предыдущим учетом, общая засоренность при уровне насыщения 10...30 % увеличилась не более, чем в 1,52 раза, а при концентрации сахарной свёклы 40...50 % общая засоренность посевов сахарной свёклы увеличилась более чем в 1,7 раза. Перед уборкой доля двудольных растений увеличивалась с 78,2 % при 10 % уровне насыщения до 86,8 % при 50 %, а доля злаковых снижалась в 1,65 раза.

Ключевые слова: сахарная свекла, севооборот, сорные растения, видовой состав, засоренность.

Для цитирования: Флористический состав и изменение засоренности посевов сахарной свёклы в зависимости от уровня насыщения севооборота / Е. В. Жеряков, А. В. Носов, С. А. Семина, Ю. И. Жерякова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 6-11. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-6-11

Floristic composition and changes in weed infestation of sugar beet root crops depending on the share of this crop in the crop rotation structure

E. V. Zheryakov[✉], **A. V. Nosov**, **S. A. Semina**, **Yu. I. Zheryakova**

FSBEI HE Penza State Agrarian University

440014, Penza, Botanicheskaya St., 30

[✉]zheryakov.e.v@pgau.ru

Abstract. The study was conducted to examine the species composition and dynamics of weed infestation depending on the share of the sugar beet root in crop rotation for further development of agronomic methods for weed control. Field experiments were conducted on leached black soil in the forest-steppe of the Middle Volga region from 2008 to 2017. The experiments were conducted in 10-field crop rotations, each with one share (10%, 20%, 30%, 40% and 50%). It was only time crop rotation. One field was added to the field rotation each year. The first rotation ended in 2017. As the share of sugar beet root in the rotation increased from 10% to 50%, a tendency to a decrease in the total number of weeds in the full emergence phase was observed. At the "full emergence" stage, the subtype of biennial and triennial weeds was most prevalent in sugar beet root crops: 36.06–51.17 weeds/m², depending on the share. *Amaranthus retroflexus* was the most common weed, the abundance of white goosefoot was two to four times lower. By the stage leaf closing in the row spacings, an increase in the number of cereal weeds was noted between the rows; however, their number was significantly (3.9–8.1 times) lower than that of dicotyledonous weeds. The share of dicotyledonous weeds increased from 79.6–81.1% at a crop rotation share of 10–30% to 80.9% and to 89.1% at a share of 40–50%. By the harvest time, the total weed

infestation at the share of 10-30% had increased by no more than 1.52 times, compared to the previous record, while at a sugar beet concentration of 40-50%, the total weed infestation of sugar beet crops had increased by more than 1.7 times. Before the harvest, the proportion of dicotyledonous plants increased from 78.2% at a 10% share to 86.8% at 50% share, while the proportion of cereals decreased by 1.65 times.

Keywords: sugar beet root, crop rotation, weeds, species composition, weed infestation.

For citation: Floristic composition and changes in weed infestation of sugar beet root crops depending on the share of this crop in the crop rotation structure / E. V. Zheryakov, A. V. Nosov, S. A. Semina, Yu. I. Zheryakova // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 6-11 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-6-11

Введение

Концепция развития современного земледелия определяет структуру посевных площадей для выращивания сахарной свёклы и предъявляет высокие требования к условиям возделывания и степени насыщенности севооборота [1, 2, 3]. Урожайность сахарной свеклы зависит от звеньев севооборота, системы удобрений, насыщенности севооборота культурой и зоны увлажнения. Существенное влияние на урожайность сахарной свеклы оказывает насыщение севооборота самой культурой. В современных условиях в связи с изменением хозяйственной деятельности увеличились площади посевов под кукурузой и подсолнечником, и уменьшилась концентрация сахарной свеклы в севообороте (с 30 до 10...20 %). [4]. При возделывании сельскохозяйственных культур большое внимание уделяется снижению численности сорных растений, поскольку засоренные посевы культур снижают урожайность, ухудшают качество продукции, увеличивают её себестоимость [5, 6, 7]. Сорные растения существенно снижают урожай сельскохозяйственных культур и зачастую его потери могут достигать 30 % и более [8, 9].

В современном земледелии, несмотря на наличие широкого набора средств борьбы с сорняками, севооборот продолжает оставаться наиболее доступным и эффективным способом регулирования их численности. Сахарная свекла относится к культурам, отличающимся низкой конкурентной способностью по отношению к сорнякам, особенно в начале вегетации. В хозяйствах, специализирующихся на выращивании сахарной свеклы, очень актуальна проблема максимально возможного насыщения севооборотов сахарной свеклой [10]. Однако при этом отмечается ухудшение агроэкологического и фитосанитарного состояния почвы, что может привести к снижению урожайности как сахарной свеклы, так и последующих культур севооборота [11, 12]. Ряд исследователей отмечает, что засоренность посевов сахарной свеклы находится в прямой зависимости от насыщенности ею севооборота. В бессменных посевах и специализированных севооборотах возрастает опасность распространения сорняков [13, 14, 15], поэтому изучение влияния уровня насыщенности севооборота сахарной свеклой на засоренность посевов является актуальной задачей.

Цель исследования – изучить влияние степени насыщенности севооборота сахарной свеклой на фитосанитарное состояние и динамику засоренности посевов в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2008-2017 гг. в ООО «Красная Горка» Колышлейского района Пензенской

области в полевых 10-польных севооборотах, каждый из которых включает один уровень насыщения (10 %, 20 %, 30 %, 40 % и 50 %). Чередование культур проходило только во времени. Вхождение в полевой севооборот осуществлялось ежегодно одним полем. Повторность в опыте - трехкратная, площадь делянки – 540 м². В годы исследований возделывались гибриды сахарной свеклы нормально-урожайного направления (NE типа). Норма высева 130 тыс. шт./га. Учет засоренности по вегетирующим сорнякам проводили количественным методом [16]. Сорняки подсчитывали три раза – в фазу полных всходов, в период смыкания листьев в междурядьях и перед уборкой. Почва – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, пахотный слой которого характеризовался следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса 5,48...5,64 %, подвижных форм азота (по Корнфилду) 102...106 мг/кг, фосфора и калия – 91...97 и 100...112 мг/кг соответственно; pH_{KCl} – 5,2...5,5, Нг– 4,7...4,9 мг-экв./100 г.

Результаты

Фитосанитарная обстановка на полях определяет величину урожая, его качество и стабильность. Проведенные исследования и анализ полученных данных показали, что в годы проведения опыта в посевах сахарной свеклы в составе агрофитоценозов была отмечена сеgetальная флора следующих видов: марь белая (*Chenopodium album* L.), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), пикульник обыкновенный (*Galeopsis tetrahit* L.), редька дикая (*Raphanus raphanistrum* L.), ярутка полевая (*Thlaspi arvense* L.), горец вьюнковый (*Polygonum convolvulus* L.), щетинник сизый (*Setaria glauca* L.), просо куриное (*Echinochloa crusgalli* L.), бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.). В целом, тип засоренности посевов сахарной свеклы, определяемый произрастанием доминирующих, наиболее вредоносных видов сорняков в условиях проведения опыта, характеризуется как сложный, включающий различные их биотипы и биогруппы.

Наблюдения за динамикой численности сорных растений показали, что их количество постепенно возрастает от фазы массовых всходов сахарной свёклы до уборки (табл. 1). Динамика численности сорняков в посевах культуры без обработки гербицидами в течение вегетации выражалась в увеличении численности как однодольных, так и двудольных сорняков вне зависимости от уровня насыщения севооборотов сахарной свёклы.

При увеличении уровня насыщения от 10 % до 50 % наблюдается тенденция к снижению общей численности сорных растений в фазе полных всходов.

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

Это связано, главным образом, с конкуренцией между растениями сахарной свёклы и сорняками за ресурсы (свет, воду, питательные вещества). Однако к фазе уборки эта разница нивелируется, и при высоких уровнях насыщения (40...50 %) численность сорняков может быть даже выше, чем при низких (10 %).

Среди двудольных сорняков доминирующими являлись малолетние виды. Выявлено, что с увеличением уровня насыщенности севооборота до 40 %, количество мари белой снижается, а дальнейшее насыщение севооборотов сахарной свёклой приводит к увеличению встречаемости данного сорняка. Также установлено, что по мере насыщения севооборота

сахарной свёклой количество растений щирицы запрокинутой сократилось. Количество многолетних сорняков (бодяк полевой, вьюнок полевой) относительно невелико, но их численность увеличивается от фазы всходов к уборке при всех уровнях насыщения севооборотов, причем отмечено увеличение количества вьюнка полевого по мере увеличения уровня насыщения севооборота (табл. 1). Численность злаковых сорняков также возрастает в течение вегетации, но увеличение доли сахарной свёклы в севообороте сопровождается снижением количества злаковых сорняков.

Таблица 1. Динамика численности сорных растений на посевах сахарной свёклы, шт. /м², среднее за 2008-2017 гг.

Уровень насыщения, %	Фаза развития сахарной свёклы	Двудольные								Однодольные, всего
		всего	многолетние			малолетние				
			всего	из них		всего	из них			
				бодяк полевой	вьюнок полевой		щирица запрокинутая	марь белая	другие	
10	1*	51,17	—	—	—	51,17	21,52	5,45	24,21	3,15
	2	78,04	5,50	3,90	1,60	72,54	32,63	8,11	31,80	18,20
	3	116,86	10,01	7,10	2,91	106,85	43,98	17,99	44,88	32,63
20	1	43,95	0,15	0,15	—	43,80	18,84	4,70	20,26	2,59
	2	69,32	5,30	4,26	1,04	64,02	30,21	6,75	27,06	17,81
	3	109,72	10,91	7,84	3,07	98,81	39,27	18,26	41,28	26,83
30	1	37,83	0,11	0,11	—	37,72	15,07	4,26	18,39	2,29
	2	66,04	5,37	4,22	1,15	60,67	29,81	6,76	24,11	15,59
	3	99,60	10,92	7,80	3,12	88,68	36,58	16,61	35,50	23,72
40	1	37,29	0,14	0,12	0,02	37,15	13,91	4,56	18,68	1,82
	2	58,99	5,67	4,23	1,44	53,32	22,74	6,81	23,77	11,67
	3	99,49	14,19	10,62	3,57	85,30	33,49	16,02	35,79	19,95
50	1	37,02	0,96	0,17	0,79	36,06	11,18	4,66	20,22	1,37
	2	59,58	7,87	4,25	3,62	51,71	16,10	6,97	28,64	7,28
	3	102,41	16,36	10,87	5,49	86,05	24,49	17,05	44,51	15,56

Примечание: 1* – полные всходы, 2 – смыкание листьев в междурядьях, 3 – техническая спелость (уборка)

В фазе «полные всходы» в посевах сахарной свёклы среди биологических подтипов больше всего представлен подтип малолетних сорняков – 36,06...51,17 шт./м² в зависимости от уровня насыщения, а преобладающим по численности видом сорной растительности была щирица запрокинутая, встречающаяся преимущественно в фазе семядолей-двух настоящих листьев, количество мари белой было в два-четыре раза меньше. На момент массовых всходов двудольные многолетние сорняки были представлены двумя видами: бодяк полевой и вьюнок полевой, а численность их варьировала от 0,11 до 0,96 шт./м². Количество злаков составило 1,37...3,15 шт./м².

Анализ численности сорных растений показывает явное преобладание двудольных сорняков на всех этапах роста и развития сахарной свёклы, особенно выделяется их значительный рост с фазы смыкания листьев в междурядьях. Многолетние двудольные, такие как бодяк полевой и вьюнок полевой, хоть и присутствуют, но не оказывают определяющего влияния на общую картину засоренности. Их встречаемость составляла 5,30...7,87 шт./м². Основную массу двудольных сорняков формируют малолетние виды, среди которых лидируют щирица запрокинутая и марь белая –

16,10...32,63 шт./м² и 6,75...8,11 шт./м² соответственно. При этом наблюдается преобладание других малолетних сорняков над щирицей запрокинутой и марью белой. Среди злаковых сорняков также отмечено увеличение численности к фазе смыкания листьев в междурядьях, однако их количество значительно (в 3,9...8,1 раза) меньше по сравнению с двудольными.

По уровню наличия сорных растений была определена степень засоренности посевов сахарной свёклы отдельными видами сорняков (*Методы учета структуры сорного компонента в агрофитоценозах: учебное пособие / И. В. Фетюхин, А. П. Авдеенко, С. С. Авдеенко и др. Персиановский: Донской ГАУ. 2018. 76 с.*). К фазе смыкания листьев в междурядьях по многолетним двудольным сорнякам степень засоренности характеризовалась как очень слабая и слабая вне зависимости от уровня насыщенности севооборота. Степень засоренности малолетними двудольными сорняками характеризовалась как «сильная». Учет общего количества сорняков в период интенсивного роста надземной массы сахарной свёклы показал, что независимо от уровня насыщенности ею севооборота степень засоренности посевов была «очень сильная».

К уборке, по сравнению с предыдущим учетом, отмечено увеличение количества сорных растений, но выявлено, что общая засоренность при уровне насыщения 10...30 % увеличилась не более, чем в 1,52 раза. При концентрации сахарной свёклы 40 % и более общая засоренность посевов сахарной свёклы увеличилась более, чем в 1,7 раза, хотя количество сорняков

было меньше. Количество двудольных сорняков также увеличилось в 1,49...1,72 раза, злаковых – в 1,50...2,14 раза.

В течение вегетации изменяется не только количество сорных растений в посевах сахарной свёклы, но соотношение между их различными видами (табл. 2).

Таблица 2. Доля участия отдельных видов сорняков в структуре общей засоренности, % от общего количества сорняков

Уровень насыщения, %	Фаза развития сахарной свёклы	Двудольные								Однодольные, всего
		Всего	Многолетние			Малолетние				
			Всего	Из них		Всего	Из них			
				Бодяк полевой	Вьюнок полевой		Щирица запрокинутая	Марь белая	Другие	
10	1*	94,2	0,0	0,0	0,0	94,2	39,6	10,0	44,6	5,8
	2*	81,1	5,7	4,1	1,7	75,4	33,9	8,4	33,0	18,9
	3*	78,2	6,7	4,7	1,9	71,5	29,4	12,0	30,0	21,8
20	1*	94,4	0,3	0,3	0,0	94,1	40,5	10,1	43,5	5,6
	2*	79,6	6,1	4,9	1,2	73,5	34,7	7,7	31,1	20,4
	3*	80,4	8,0	5,7	2,2	72,4	28,8	13,4	30,2	19,6
30	1*	94,3	0,3	0,3	0,0	94,0	37,6	10,6	45,8	5,7
	2*	80,9	6,6	5,2	1,4	74,3	36,5	8,3	29,5	19,1
	3*	80,8	8,9	6,3	2,5	71,9	29,7	13,5	28,8	19,2
40	1*	95,3	0,4	0,3	0,1	95,0	35,6	11,7	47,8	4,7
	2*	83,5	8,0	6,0	2,0	75,5	32,2	9,6	33,6	16,5
	3*	83,3	11,9	8,9	3,0	71,4	28,0	13,4	30,0	16,7
50	1*	96,4	2,5	0,4	2,1	93,9	29,1	12,1	52,7	3,6
	2*	89,1	11,8	6,4	5,4	77,3	24,1	10,4	42,8	10,9
	3*	86,8	13,9	9,2	4,7	72,9	20,8	14,5	37,7	13,2

Примечание: 1* – полные всходы 2 – смыкание листьев в междурядьях 3 – техническая спелость (уборка)

Обсуждение

Независимо от уровня насыщения севооборота отмечено преимущественное преобладание двудольных сорняков в общей структуре засоренности посевов сахарной свёклы на всех этапах развития культуры. Доля двудольных сорняков варьируется от 78,2 % до 96,4 % сегетальной растительности, что значительно превышает долю однодольных, которая составила 3,6...21,8 %. Увеличение уровня насыщения севооборота сахарной свёклой способствует незначительному росту доли двудольных сорняков и увеличению доли бодяка полевого особенно к фазе технической спелости (уборке). Это же отмечают в своих исследованиях Сергиенко В.Я., Сергиенко А.В., Сокольская Г.И. [17].

В динамике от фазы всходов к уборке наблюдается тенденция к снижению доли двудольных сорняков и увеличению доли однодольных. Необходимо отметить, что в фазе полных всходов с увеличением уровня насыщения севооборотов сахарной свёклой наблюдается тенденция к изменению видового состава сорняков (табл. 2). Доля щирицы запрокинутой при 10...20 % насыщении составляла 39,6...40,5 % общего количества сорняков, и при дальнейшем увеличении концентрации сахарной свёклы начинает постепенно снижаться до 29,0 % при 50 % насыщении. В то же время доля мари белой оставалась практически одинаковой при увеличении уровня насыщения до 30 % и составляла 10,0...10,6 %, а при сокращении сроков возврата сахарной свёклы доля мари белой в общей структуре засоренности посевов

увеличивалась и достигала 12,1 % при 50 % уровне насыщения севооборотов.

С увеличением уровня насыщения севооборотов наблюдается тенденция к росту доли и других двудольных сорняков, объединенных в одну группу в общей структуре засоренности посевов сахарной свёклы. В фазе смыкания листьев в междурядьях наблюдалось преобладание двудольных сорняков, их доля при уровне насыщения севооборота 10...30 % составляла 79,6...81,1 %. С увеличением уровня насыщения севооборота (с 30 % до 50 %) наблюдается явная тенденция к росту доли сорняков (от 80,9 % до 89,1 %). Такая же тенденция увеличения численности сорных растений в 1,77 раза при повышении насыщенности севооборота сахарной свеклой с 10 до 40 % выявлена Е.А. Дворянкиным [18]. В.В. Исаев отмечает, что при росте доли площадей под сахарной свеклой с 10 до 40 % прибавка общего количества сорняков составила 2,66 раза [19].

В то же время доля однодольных сорняков, наоборот, повышалась с 18,9 % до 20,4 % при увеличении уровня насыщения севооборота до 20 %. При дальнейшем насыщении севооборота сахарной свёклой доля злаковых сорняков постепенно снижается до 10,9 % от общей засоренности посевов. Представленные данные показывают явную зависимость видового состава сорной растительности в посевах сахарной свёклы от уровня насыщения севооборота. Наименьшая доля двудольных растений (кроме щирицы запрокинутой и мари белой) была отмечена при 30 % уровне насыщения севооборота

(29,5 %). При насыщении 10 %, 20 % и 40 % доля других двудольных растений, объединенных в одну общую группу, была на уровне 31,0...33,6 %. В севообороте, где срок возврата сахарной свёклы сокращен до одного года, в структуре общей засоренности доля других двудольных сорных растений достигала 42,8 %. Как указывает Дворянкин Е.А., многолетние двудольные сорняки, представленные в меньшем количестве, также проявили тенденцию к накоплению до 4,5 шт./м² при насыщении севооборотов сахарной свеклой 40 % [19].

В период интенсивного роста листовой поверхности сахарной свёклы отмечено увеличение доли бодяка полевого с 4,1 % при 10 % уровне до 6,4 % при насыщении до 50 %. Доля вьюнка полевого увеличивалась при насыщении севооборота сахарной свёклы 20 % и более. Необходимо отметить, что при насыщенности севооборота 50 % в общей структуре засоренности доля вьюнка полевого составляла 5,4 %, что более чем в 2,5 раза больше, чем при уровне насыщения 40 %, и в 4,5 раза больше, чем при 20 % уровне. Доля щирцы запрокинутой по мере насыщения севооборота сахарной свёклы до 30 % возрастала, а дальнейшее увеличение количества полей свёклы приводило к снижению доли щирцы запрокинутой, и при 50 % насыщении севооборота она была на 12,4 абс. % меньше максимальной доли в структуре общей засоренности. Доля мари белой оставалась относительно стабильной, с небольшими колебаниями в пределах от 7,7 % до 10,4 %.

Учет засоренности посевов сахарной свёклы перед уборкой показал, что доля двудольных растений увеличивалась на 8,8 абс. % при росте уровня насыщения с 10 % до 50 %. Обратное пропорциональное изменение наблюдалось у злаковых: их доля снижалась в 1,65 раза. Среди многолетних двудольных сорняков доля бодяка полевого увеличивалась почти вдвое при росте насыщения с 10 % до 50 %. Доля вьюнка полевого была невелика и практически не изменялась при повышении концентрации сахарной свёклы в севообороте до 40 % (колебалась от 1,9 % до 3,0 %), а при 50 % уровне насыщения составляла уже 4,7 %. Доля щирцы запрокинутой по мере увеличения уровня насыщения севооборота снижается на 8,6 абс. %. Долю мари белой в структуре общей засоренности посевов перед уборкой сахарной свёклы в зависимости от уровня насыщения севооборота можно охарактеризовать постоянной – от 12,0 % до 14,5 %. По сведениям Е.А. Дворянкина при насыщении севооборота сахарной свеклой 40 % количество однолетних двудольных сорняков было в 1,8 раза выше, чем при 10 % уровне насыщения и на 69,4 % выше, чем в варианте с 20 % [18].

Доля других двудольных сорняков оставалась практически неизменной при насыщении севооборота от 10 % до 40 % и составляла 30,0...30,2 %, а при 50 % уровне она увеличилась до 37,7 %. Доля однодольных сорняков при увеличении концентрации сахарной свёклы уменьшается в 1,6 раза.

Заключение

От фазы всходов к уборке наблюдается тенденция к снижению доли двудольных сорняков и увеличению доли однодольных.

В фазе смыкания листьев в междурядьях наименьшая доля двудольных растений (кроме щирцы запрокинутой и мари белой) была отмечена при 30 % уровне насыщения севооборота. К уборке общая засоренность посевов сахарной свёклы при уровне насыщения 10...30 % увеличилась не более чем в 1,52 раза, а при концентрации 40...50 % общая засоренность увеличилась более чем в 1,73 раза.

Доля двудольных растений увеличивалась на 8,8 абс. % при росте уровня насыщения с 10 % до 50 %. Обратное пропорциональное изменение наблюдалось у злаковых: их доля снижалась в 1,65 раза.

Литература

1. Формирование севооборотов для получения заданного количества свеклосахарного сырья в лесостепи Центрального Черноземья / А. С. Акименко, Н.В. Долгополова, В.Г. Вавин и др. // Достижения науки и техники в АПК. 2020. №11. Т 34. С. 16-20.
2. Система защиты картофеля от сорных растений в условиях юга Нечерноземной зоны / Е. В. Тюкина, Д. В. Бочкарев, А. В. Бардин и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. №5 (223). С. 16-23. doi:10.53083/1996-4277-2023-223-5-16-23
3. Минакова О.А., Косякин П.А., Боронтов О.К. Основные результаты научных исследований в области технологии возделывания сахарной свеклы // Сахарная свекла. 2022. № 9. С. 19-25.
4. Формирование урожайности культур при различных видах и структуре севооборота / Я.П. Цвей, С.А. Бондарь, Т.В. Калибачук и др. // Сахарная свёкла. 2019. № 8. С. 19-22.
5. Влияние различных мер борьбы с сорняками в севообороте на засоренность заключительного поля / Ю. Я. Спиридонов, Н. И. Будынков, И. В. Дудкин и др. // Агрохимия. 2020. № 12. С. 38-44.
6. Ермолаева Г. В., Куликова А. Х., Волкова Е. С. Фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы в зависимости от технологий возделывания // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2 (70). С. 75-83.
7. Чуюн Н. А., Брескина Г. М. Оценка фитосанитарного состояния сельскохозяйственных посевов с использованием агротехнологий // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 4. С. 29-35.
8. Сыромятников В. В., Тойгильдин А. Л., Тойгильдина И. А. Динамика изменения засоренности посевов полевых культур в условиях Ульяновской области // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 2. С. 29-35. doi: 10.18286/1816-4501-2023-2-29-35.
9. Шпанев А. М., Смур В. В. Пространственная Структура засоренности зерноотравно-пропашного севооборота на Северо-Западе России // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 4(72). С. 67-74. doi: 10.12737/2073-0462-2023-67-74. EDN QLKGDY.

10. Дворянkin E. A. Становление химического метода борьбы с сорняками в посевах сахарной свеклы в условиях ЦЧР // Сахарная свекла. 2022. № 9. С. 31-34.

11. Crop Rotational Effects on Yield Formation in Current Sugar Beet Production – Results From a Farm Survey and Field Trials / H-J. Koch, K. Trimpler, A. Jacobs et al. // Front. Plant Sci. 2018. № 9. P. 231.

12. Jacobs A., Koch H.-J., Märländer B. Using preceding crop effects for climate smart sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivation // European Journal of Agronomy. 2019. Vol. 104. P. 13-20. doi:10.18286/1816-4501-2019-1-27-34.

13. Мерзликин М. А., Минакова О. А., Вилков В. М. Комплексная защита сахарной свеклы от сорняков, болезней и вредителей в ЦЧР // Сахар. 2021. № 3. С. 50-56.

14. Влияние различных мер борьбы с сорняками в севообороте на засоренность заключительного поля / Ю. Я. Спиридонов, Н. И. Будыков, И. В. Дудкин и др. // Агрохимия. 2020. № 12. С. 38-44.

15. Биологически и экологически эффективная система защиты сахарной свеклы в ЦЧР / М. А. Мерзликин, О. А. Минакова, О. В. Гамуев и др. // Вестник Курганской ГСХА. 2021. С. 4-12.

16. Фитосанитарная диагностика / А. Ф. Ченкин, В. А. Захаренко, Г. С. Белозерова и др.; под ред. А. Ф. Ченкина. Москва: Колос, 1994. 320 с.

17. Сергиенко В. Я., Сергиенко А. В., Сокольская Г. И. О насыщении севооборотов сахарной свеклой // Сахарная свекла. 2001. №3. С. 13-15.

18. Дворянkin E. A. Оптимизация возделывания сахарной свеклы (научно-практическое руководство). ФГБНУ "Всероссийский НИИ сахарной свеклы и сахара им. А. Л. Мазлумова. 2019. 252 с.

19. Исаев В. В. Агротехнические приемы борьбы с сорняками // Защита растений. 1994. № 3. С. 32-35.

References

1. Formation of crop rotations to obtain a specified amount of sugar beet raw materials in the forest-steppe of the Central Black Soil Region / A. S. Akimenko, N. V. Dolgoplova, V. G. Vavin, et al. // Achievements of science and technology in the agro-industrial complex. 2020. No. 11. V. 34. P. 16-20.

2. A system for protecting potatoes from weeds in the southern Non-Black soil zone / E. V. Tyukina, D. V. Bochkarev, A. V. Bardin, et al. // Vestnik of the Altai State Agrarian University. 2023. No. 5 (223). P. 16-23. doi: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-16-23

3. Minakova O. A., Kosyakin P. A., Borontov O. K. Main results of scientific research in the field of sugar beet cultivation technology // Sugar beet root. 2022. No. 9. P. 19-25.

4. Formation of crop yields under different types and structures of crop rotation / Ya. P. Tsvey, S. A. Bondar, T. V. Kalibabchuk, et al. // Sugar beet root. 2019. No. 8. P. 19-22.

5. The influence of various weed control measures in crop rotation on weed infestation of the final field / Yu. Ya. Spiridonov, N. I. Budykov, I. V. Dudkin, et al. // Agrochemistry. 2020. No. 12. P. 38-44.

6. Ermolaeva G. V., Kulikova A. Kh., Volkova E. S. Phytosanitary condition of winter wheat crops depending on cultivation technologies // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 2 (70). P. 75-83.

7. Chuyan N. A., Breskina G. M. Assessment of the phytosanitary condition of agricultural crops using agricultural technologies // Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2023. No. 4. P. 29-35.

8. Syromyatnikov V. V., Toygildin A. L., Toygildina I. A. Dynamics of changes in weed infestation of field crops in the Ulyanovsk region // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2023. No. 2. P. 29-35. doi: 10.18286/1816-4501-2023-2-29-35.

9. Shpanev A. M., Smuk V. V. Spatial Structure of Weed Infestation in Grain-Grass-Row Crop Rotation in Northwest Russia // Bulletin of Kazan State Agrarian University. 2023. Vol. 18. No. 4(72). P. 67-74. doi: 10.12737/2073-0462-2023-67-74. EDN QLKGDY.

10. Dvoryankin E. A. Development of a chemical method of weed control in sugar beet root crops under the conditions of the Central Black Soil Region // Sugar beet root. 2022. No. 9. P. 31-34.

11. Crop rotation effects on yield formation in current sugar beet production – results from a farm survey and field trials / H-J. Koch, K. Trimpler, A. Jacobs et al. // Front. Plant Sci. 2018. No. 9. p. 231.

12. Jacobs A., Koch H.-J., Märländer B. Using preceding crop effects for climate smart sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivation // European Journal of Agronomy. 2019. Vol. 104. P. 13-20. doi:10.18286/1816-4501-2019-1-27-34.

13. Merzlikin M. A., Minakova O. A., Vilkov V. M. Integrated protection of sugar beet from weeds, diseases and pests in the Central Black Soil Region // Sugar. 2021. No. 3. P. 50-56.

14. The influence of various weed control measures in crop rotation on weed infestation of the final field / Yu. Ya. Spiridonov, N. I. Budykov, I. V. Dudkin, et al. // Agrochemistry. 2020. No. 12. P. 38-44.

15. A biologically and ecologically effective system for sugar beet root protection in the Central Black Soil Region / M. A. Merzlikin, O. A. Minakova, O. V. Gamuyev, et al. // Vestnik of the Kurgan State Agricultural Academy. 2021. P. 4-12.

16. Phytosanitary Diagnostics / A. F. Chенкин, V. A. Zakharchenko, G. S. Belozeroва, et al.; edited by A. F. Chенкин. Moscow: Kolos, 1994. 320 p.

17. Sergienko V. Ya., Sergienko A. V., Sokolskaya G. I. On the share of crop rotations with sugar beet root // Sugar beet root. 2001. No. 3. P. 13-15.

18. Dvoryankin E. A. Improvement of sugar beet root cultivation (scientific and practical guide). All-Russian Research Institute of Sugar Beet Root and Sugar named after A. L. Mazlumov. 2019. 252 p.

19. Isaev V. V. Agrotechnical weed control methods // Plant Protection. 1994. No. 3. P. 32-35.

Метаболические индексы как микробиологические индикаторы здоровья почв

Е. А. Захарова^{1,2✉}, специалист НОПЦ генетических и лабораторных технологий

Г. В. Кнурова^{1,3}, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Р. И. Сафин⁴, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой

А. Л. Тойгильдин⁵, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

² Самарский государственный медицинский университет

443099, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 89.

³ Некоммерческое партнерство «Национальное движение сберегающего земледелия», 443099, г. Самара, ул. Куйбышева, д. 88.

⁴ Казанский государственный аграрный университет,

420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65.

⁵ Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства

433315, Ульяновская обл., п. Тимирязевский, ул. Институтская, д. 19.

✉info@rmrl.ru

Резюме. Целью исследования было оценить метаболические индексы почвенных микроорганизмов как количественные индикаторы здоровья почв и изучить их взаимосвязь с урожайностью, содержанием гумуса и углеродом микробной биомассы. Исследование проведено осенью 2024 года в Самарской области (Похвистневский район, село Новый Аманак) на чернозёме типичном остаточно-карбонатном среднегумусном. Для анализа отобрано 30 образцов почвы с двух участков поля, различавшихся по индексам NDVI (зелёный и красный), на глубинах 0...10 см и 10...20 см, а также собраны растительные остатки. Образцы консервировали в тиогликолевой среде и культивировались на пяти питательных средах (Уриселект, Кровяной агар, Бруцелла агар, агар Рогоза, агар Редди) в аэробных, анаэробных и микроаэрофильных условиях. Идентификацию микроорганизмов проводили методом MALDI-ToF масс-спектрометрии. Рассчитаны метаболические индексы: аэробный, анаэробный, микроаэрофильный и их соотношения. При общей оценке корреляция индексов с показателями плодородия не превышала 0,5. Дифференциация по слоям почвы и индексам NDVI позволила выявить более высокие коэффициенты — до 0,7...0,9. Наиболее значимые результаты получены для микроаэрофильно-анаэробного индекса (МА/АН) на среде Бруцелла агар: 0,52...0,78 с гумусом, 0,62...0,76 с урожайностью и 0,61...0,66 с углеродом микробной биомассы. Результаты демонстрируют, что метаболические индексы микроорганизмов, рассчитанные с использованием расширенного набора питательных сред и с учётом условий культивирования являются перспективными количественными индикаторами здоровья почв. Наиболее информативными оказались среды Бруцелла агар, Кровяной агар и агар Редди, что делает их полезными для мониторинга почвенного здоровья и оптимизации сельскохозяйственных практик.

Ключевые слова: метаболические индексы микроорганизмов, здоровье почвы, индексы NDVI, урожайность, плодородие почвы, гумус, углерод микробной массы.

Для цитирования: Метаболические индексы как микробиологические индикаторы здоровья почв / Е. А. Захарова, Г. В. Кнурова, Р. И. Сафин, А. Л. Тойгильдин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 12-26. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-12-26

Metabolic indices as microbiological indicators of soil health

E. A. Zakharova^{1,2✉}, G. V. Knurova^{1,3}, R. I. Safin⁴, A. L. Toygildin⁵

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

443086, Samara, Moskovskoe Shosse St., 34

² Samara State Medical University

443099, Samara, Chapaevskaya St., 89

³Non-profit Partnership "National Movement of Conservation Agriculture", 443099, Samara, Kuibysheva St., 88

⁴Kazan State Agrarian University

420015, Kazan, K. Marksa, 65

⁵Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture

433315, Ulyanovsk Region, Timiryazevsky Village, Institutskaya Street, 19

✉info@rmrl.ru

Abstract. The aim of this study was to evaluate the metabolic indices of soil microorganisms as quantitative indicators of soil health and to examine their relationships with crop yield, humus content, and microbial biomass carbon. The study was conducted in the fall of 2024 in the Samara Region (Pokhvistnevsky District, Novy Amanak village) on typical residual-

carbonate, medium-humus chernozem. Thirty soil samples were collected from two field sites with different NDVI indices (green and red), at depths of 0–10 cm and 10–20 cm, along with plant residues. The samples were preserved in thioglycolate medium and cultured on five nutrient media (Uriselect, Blood Agar, Brucella Agar, Rogosa Agar, and Reddy Agar) under aerobic, anaerobic, and microaerophilic conditions. Microorganisms were identified using MALDI-ToF mass spectrometry. The following metabolic indices were calculated: aerobic, anaerobic, and microaerophilic, as well as their ratios. In an overall assessment, the correlation between the indices and fertility indicators did not exceed 0.5. Differentiation by soil layers and NDVI indices revealed higher coefficients—up to 0.7–0.9. The most significant results were obtained for the microaerophilic-anaerobic index (MA/AN) on Brucella agar medium: 0.52–0.78 with humus, 0.62–0.76 with yield, and 0.61–0.66 with microbial biomass carbon. The results demonstrate that microbial metabolic indices calculated using an extended set of nutrient media and taking into account cultivation conditions are promising quantitative indicators of soil health. The most informative media were Brucella agar, Blood agar and Reddy agar, making them useful for monitoring soil health and optimizing agricultural practices.

Keywords: Microbial metabolic indices, soil health, NDVI indices, crop yield, soil fertility, humus, microbial carbon.

For citation: Metabolic indices as microbiological indicators of soil health / E. A. Zakharova, G. V. Knurova, R. I. Safin, A. L. Toygildin // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 12-26 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-12-26

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект FSSS-2024-0022 (регистрационный номер: 1023112900147-4 от 31.01.24). The study was supported by the Ministry Education and Science of the Russian Federation under project FSSS-2024-0022 (Registration number: 1023112900147-4, 31.01.24)

Введение

Микробиота – один из ключевых элементов, определяющий здоровье почвы. Именно благодаря почвенным микроорганизмам становится возможным круговорот таких макроэлементов, как азот, углерод, фосфор и сера [1, 2, 3]. Кроме того, благодаря симбиозу с растениями именно микроорганизмы регулируют поток не менее важных для здоровья растений микроэлементов за счёт их химического превращения из неактивной в активную форму, а также поддерживают необходимый уровень почвенных метаболитов [4, 5]. Микробиомы, связанные с растениями, повышают их жизнеспособность, оказывая позитивное влияние на ускорение роста, усвоение питательных веществ, устойчивость к стрессу и сопротивляемость патогенам [6, 7]. Во многих исследованиях также подчеркивается положительная роль ризосферных грибковых сообществ в агроэкосистемах [8, 9].

Термин «микробиом» относится ко всей микробиоте (т. е. сообществам микроорганизмов, колонизирующим определённую среду) вместе с «театром деятельности» включающим: (i) пептиды, липиды, полисахариды, ДНК и РНК, которыми обладают микроорганизмы (их структурные элементы); (ii) метаболиты, вырабатываемые микроорганизмами; (iii) условия окружающей их среды [10].

Сокращение микробного разнообразия снижает многофункциональность наземных экосистем, негативно влияя на предоставление таких экосистемных услуг, как регулирование климата, плодородие почвы, производство растениеводческой продукции наземными экосистемами [11]. С другой стороны, климат и почвенные свойства оказывают значительное влияние на таксономические составы микроорганизмов и меньшее влияние – на функциональные потенциалы [12]. Поэтому при интеграции микробиологических показателей с традиционно проводимыми почвенными исследованиями, учитывающими такие факторы, как свойства почвы, продолжительность

внедрения агропрактик и глубина отбора проб, можно разработать эффективные стратегии управления сельскохозяйственным производством, включающие повышение устойчивости и продуктивности агроэкосистем [13, 14]. Устойчивое сельское хозяйство с использованием микробиома представляет собой действенную стратегию для обеспечения здоровья и продуктивности растений, тем самым влияя на всю пищевую цепочку и, следовательно, на микробиом и здоровье человека в рамках концепции «Единое здоровье» [7, 15].

Вместе с тем следует отметить, что микробиологический анализ в настоящее время не входит в перечень обязательных исследований сельскохозяйственных почв, что в основном вызвано отсутствием стандарта «микробиологически здоровой» почвы и соответствующих референсных показателей. Микробиологические исследования проводят только единичные сельскохозяйственные предприятия, причем даже после получения результатов у большинства из них отсутствует чёткое понимание значения выполненных анализов и дальнейшей стратегии.

На это есть целый ряд системных причин. Во-первых, при микробиологическом исследовании традиционный сбор почвенных образцов сопряжен с агрессивным воздействием на почвенные микроорганизмы [16], что ставит под сомнение получаемый в итоге результат. Кроме того, стандартная практика работы с почвенной микрофлорой в настоящее время в основном сводится к определению бацилл, поскольку считается, что большая часть почвенных микроорганизмов относится к сложно культивируемым или некультивируемым [14, 17]. Их изучение сегодня возможно в первую очередь с помощью метагеномного анализа, однако до сих пор нет чёткого представления, как поддерживается огромное таксономическое разнообразие в почве и как микробное разнообразие и состав связаны с экосистемными функциями тех или иных микроорганизмов и микробиома в целом [18, 19]. Ограничение метагеномного

анализа также связано с невозможностью определить функциональные характеристики конкретных групп микроорганизмов, а также с относительно высокой стоимостью анализа. В связи с этим нет четких рекомендаций относительно целевого внесения биопрепаратов для различных регионов, почвенно-климатических условий и дефицитов [18].

Совершенствование методов управления за счёт внедрения полезных микробных сообществ и повышение устойчивости к изменению климата путём содействия адаптивным стратегиям в отношении условий окружающей среды – основные задачи, которые помогут решить проблемы изменения климата, деградации земель и продовольственной безопасности [14].

И первоочередной задачей для микробиологической коррекции является выбор индикаторов здоровой почвы. В соответствии с подходом «экосистемных услуг» новые методы должны быть сосредоточены на определении функций почвы, включающих круговорот питательных веществ и выбросы парниковых газов, борьбу с вредителями и стимулирование роста растений, круговорот и секвестрацию углерода, а также улучшение структуры почвы и инфильтрации влаги [20, 21].

На сегодняшний день существует целый ряд таких микробиологических индикаторов. В соответствии с мета-анализом 166 научных публикаций, выполненным в работе Cusset et al. [13], микробиологические показатели практически не зависят от климатических факторов, таких как высота над уровнем моря, влажность и количество осадков. С другой стороны, данные показатели демонстрируют высокую чувствительность – более высокую, чем содержание органического углерода и общего азота в почве, являющиеся общепринятыми индикаторами – при внедрении рациональных методов ведения сельского хозяйства (внесение органики, сохранение пожнивных остатков, выращивание покровных культур, севообороты, минимизация обработки почвы, переход на систему органического/ инновационного земледелия) и отказе от вспашки. Глубина отбора проб также имеет решающее значение, поскольку реакция показателей на вышеупомянутые факторы более выражена в верхних слоях почвы, особенно при минимизации обработки. В связи с этим авторы рекомендуют использование микробиологических показателей в качестве индикаторных при переходе к устойчивому сельскому хозяйству и включение их в рутинный мониторинг при отказе от вспашки и внедрении новых агропрактик. К таким показателям, в частности, относятся углерод микробной биомассы, рекомендуемый в условиях перехода на минимизацию обработки для чернозёмов [22], общее содержание жирных кислот в составе фосфолипидов и активность β -глюкозидазы. Данные Lopes et al. [23] показывают, что высокопродуктивные почвы демонстрируют высокие уровни микробной биомассы, дыхания и уровней активности ряда почвенных ферментов.

К этим микробиологическим показателям при оценке влияния агропрактик на здоровье почвы Semenov et al. [24] рекомендуют добавить базальное дыхание, скорость биodeградации органического вещества, методику CLPP – физиологическое профилирование на уровне сообщества и метод количественной ПЦР, используя результаты которого в реальном времени можно рассчитать долю распространенности генов различных таксономических групп: например, соотношение грибов и бактерий, и дать характеристику секвестрирующей способности почвы. Однако свободная ДНК, высвобождаемая из мёртвых микроорганизмов, может быть устойчива в почве, что потенциально приводит к переоценке количества микроорганизмов в образце либо искажениям при определении биоразнообразия [20, 25]. Это необходимо учитывать при интерпретации данных. Semenov et al. [24] подчёркивают, что только микробиологические индикаторы могут предоставить информацию о почвенном биоразнообразии и фитопатогенах, биорегуляторных и фитосанитарных функциях почв, а также облегчить понимание преобладающих процессов накопления или потери углерода при различных методах ведения сельского хозяйства.

Относительно популяций почвенных микроорганизмов Brangarí, Lyonnard, Rousk [26] указывают, что почвенные грибы менее чувствительны по сравнению с бактериями к глубине отбора проб и обработке почвы. Также в их исследовании грибы демонстрировали тенденцию к более быстрому восстановлению в пахотных землях, и в целом наблюдалась чередующаяся последовательность роста бактерий и грибов с течением времени, что предполагает конкуренцию и различные стратегии реактивации, в частности, в условиях регулярных колебаний влажности.

В почвах агроценозов соотношение популяций грибы-бактерии (F:B) является важным биоиндикатором, связанным с эффективностью секвестрации углерода [27, 28]. Грибы более эффективно депонируют углерод в виде устойчивых к разложению органических соединений, таких как хитин, поэтому почвы с преобладанием грибов более склонны к накоплению углерода и замедленному его высвобождению. Интенсивное земледелие и вспашка снижают долю грибов и способствуют преобладанию бактерий, что ограничивает потенциал секвестрации углерода в долгосрочной перспективе [1, 27]. Также показано, что изменения соотношения F:B влияют на структуру микробных сообществ, с точки зрения представленности различных таксонов [28].

Относительно сроков отбора почвенных проб многие авторы говорят о незначительных флуктуациях различных групп микроорганизмов в течение вегетационного периода, поэтому сдвиг таких сроков не препятствует установлению устойчивых закономерностей при исследовании показателей микробиологического здоровья агрогенных почв, в том числе и в многолетней динамике [27, 28, 29]. Это особенно характерно для грибов, обладающих

долгоживущими структурами (мицелий), устойчивыми к кратковременным изменениям [1].

Таким образом, к настоящему времени есть ряд микробиологических индикаторов, однако их применение весьма ограничено и не может служить основанием для принятия агрономических решений. При этом необходим поиск таких индикаторов, которые бы позволили оценивать в динамике изменение почвенной микробиоты в совокупности с изменениями урожайности и агрономическими практиками. Выбор метода необходимо осуществлять с точки зрения информативности и экономической целесообразности.

В целом все показатели микробиологического здоровья почв можно разделить на две группы: количественные и качественные, где к количественным можно отнести углерод микробной биомассы, активность микроорганизмов и ряд других численно измеряемых параметров, а к качественным – видовое разнообразие и распространённость определенных таксонов [1, 24].

На данный момент методом выбора при анализе микробиома является метагеномный анализ [1, 14, 20], однако, сегодня в практическом сельском хозяйстве его рутинное применение ограничено ввиду недоступности технологии во многих областях и высокой стоимости каждого исследования. Альтернативой может стать культуромный анализ, который сейчас применяется довольно широко, однако в связи с ограниченным количеством используемых методик и сред не является достаточно информативным.

В рамках данного исследования изучали возможности использования культуромного анализа как дифференциального метода состояния здоровья почв при сравнении участков с зеленым и красным вегетационным индексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) как индикаторы здоровья почв. В качестве количественного показателя изучали возможность использования «метаболических индексов», в роли качественного: расчет индексов видового разнообразия, анализ структуры микробиома с помощью культуромного и метагеномного анализа.

Известно, что в почве в круговороте питательных веществ, поглощении углерода и функционировании почвы в целом важную роль играют как аэробные, так и анаэробные микроорганизмы.

Аэробные микроорганизмы, которым требуется кислород, в основном отвечают за разложение органических соединений и мобилизацию питательных веществ. Аэробные бактерии и грибы играют ключевую роль в разложении мертвых организмов, возвращая питательные вещества в почву. Они способствуют круговороту азота, фосфора и других важных питательных веществ, делая их доступными для поглощения растениями. Они помогают улучшить структуру почвы, производя органические соединения, которые действуют как связующие вещества, улучшая проникновение воды и аэрацию, могут подавлять рост почвенных патогенов, способствуя здоровью растений [30].

Анаэробные микроорганизмы, напротив, развиваются в бескислородной среде и могут способствовать круговороту питательных веществ и разложению некоторых загрязняющих веществ. В частности, в ходе энергетического обмена они используют вместо кислорода альтернативные акцепторы электронов, такие как сульфат или нитрат. Кроме того, они участвуют в таких процессах, как денитрификация (превращение нитратов в газообразный азот) и разложение некоторых загрязняющих веществ в анаэробных условиях [31]. Некоторые анаэробные и факультативно-анаэробные бактерии способствуют долгосрочному хранению углерода в почве, преобразуя органические соединения в формы, менее подверженные разложению [32]. Есть данные о 10-кратном увеличении скорости минерализации при переходе из анаэробных условий в аэробные, что иллюстрирует чувствительность углерода, защищенного анаэробными микроорганизмами, к нарушениям и важность анаэробных микрорайонов в сохранении углерода в почве [33]. Анаэробные процессы, такие как восстановление железа и серы также могут способствовать круговороту питательных веществ.

Кроме того, выделяют ряд факторов, которые влияют на формирование аэробных и анаэробных условий в почве. Так, высокая влажность может создавать анаэробные условия, поскольку диффузия кислорода в жидких средах ограничена по сравнению с газами. Уплотнение уменьшает поровое пространство, препятствуя диффузии кислорода и способствуя созданию анаэробных условий. Высокое содержание органического вещества может увеличить потребление кислорода микроорганизмами и, соответственно, снижать содержание молекулярного кислорода. В общем случае, анаэробные условия чаще возникают в более глубоких слоях почвы, где проникновение кислорода ограничено.

Повторяющиеся аэробные и анаэробные условия приводят к нитрификации и денитрификации соответственно, а также меньшему выделению N_2O при нитрификации, чем при денитрификации, поэтому увеличение влажности почвы приводит к значительному снижению выбросов N_2O . Кроме того, влажность почвы способствует разложению и растворению органического углерода, что приводит к высвобождению легкодоступного углерода и способствует развитию и метаболизму почвенных микроорганизмов [34].

В последнее время также значительно возросло количество исследований метаболического состава почвенной микробиоты и ее функций. Так в исследовании Jiamin et al. [35] было изучено распределение аэробных бактерий на сельскохозяйственных угодьях Китая и обнаружена связь между текстурой почвы и обилием этих бактерий.

По-прежнему остаётся актуальным выявление путей метаболизма микроорганизмов, значимых для прогнозирования эффективности использования углерода (Carbon Use Efficiency – CUE), что приведет к

улучшению прогнозирования, связанного с потоками углерода, в глобальном масштабе [3, 36].

В исследовании Wang et al. [37] проанализирована роль анаэробных микросайтов в секвестрации углерода с точки зрения возможных механизмов их защиты от разложения. Та же группа ученых изучала синергический эффект анаэробных и аэробных процессов при микробиологическом разложении полихлорированных бифенилов (ПХБ) в почве.

Как аэробные, так и анаэробные микроорганизмы необходимы для здоровья и функционирования почвы и играют важную роль в круговороте питательных веществ, поглощении углерода и формировании структуры почвы. Поскольку легко разлагаемые субстраты часто являются дефицитным ресурсом в почве, различные группы микроорганизмов могут оптимизировать использование углерода, питательных веществ и энергии в различных условиях [38]. Понимание их роли и взаимодействий имеет решающее значение для рационального использования почвенных ресурсов и сохранения их плодородия. В связи с этим в рамках настоящего исследования предлагается изучение метаболических коэффициентов как соотношения числа КОЕ при посеве микроорганизмов на определенный перечень сред в аэробных, анаэробных и микроаэрофильных условиях и оценка их связи с показателями здоровья почв.

Цель исследования – оценить метаболические индексы микроорганизмов как микробиологические индикаторы здоровья почв и их корреляцию с урожайностью, содержанием гумуса и углеродом микробной биомассы.

Материалы и методы

Исследование проводили в Самарской области, Похвистневском районе, селе Новый Аманак на территории аграрного карбонового полигона «Агро Инженерия», где осенью 2024 г. был проведен сбор 30 образцов на территории хозяйства ООО Орловка АИЦ (прямой посев). Были отобраны два участка на поле G70 с разными NDVI индексами (зеленый и красный). Карты составлялись с помощью программного обеспечения SkyScout на основании трехлетнего NDVI. Тип почвы: чернозем типичный остаточного-карбонатный среднегумусный маломощный слабокаменистый среднесуглинистый среднесуглинистый. Севооборот: соя (2023 г.) – пшеница (2024 г.). Тип обработки: прямой посев с мульчированием растительных остатков.

На каждом из участков образцы отбирали по типу конверта на глубине 0...10 см и 10...20 см, а также были собраны растительные остатки. Образцы в полевых условиях консервировали в тиогликолевой среде (SIFIN diagnostics GmbH, Германия), в которых сохраняются аэробы, анаэробы и микроаэрофилы, и замораживали для последующего анализа и культивирования на средах Уриселект (BioRad, США), Кровяной агар (HiMedia, Индия), Бруцелла агар (HiMedia, Индия), агар Рогоза (HiMedia, Индия), Анаэробный агар (HiMedia, Индия), агар Редди (HiMedia, Индия) в

трёх условиях культивирования (аэробные, анаэробные, микроаэрофильные).

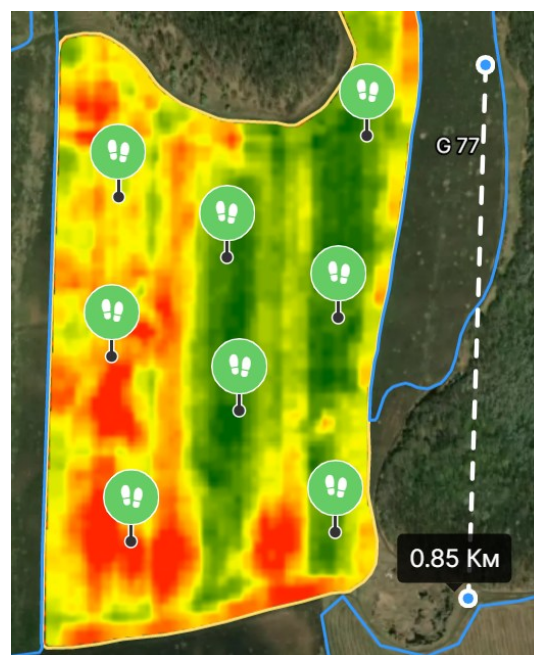


Рис. 1. NDVI-карта поля G_70 с размеченными точками отбора проб.

По 10 мкл суспензии почвы из пробирки с транспортной средой и образцом наносили на поверхность всех тестируемых питательных сред с последующим посевом по методу Дригальского. Посевы для культивирования анаэробных микроорганизмов проводили в анаэробной станции «Bactron 300-2» с последующей инкубацией в термостатном модуле внутри станции, а для культивирования микроаэрофильных и аэробных микроорганизмов – в боксах биологической безопасности 2 класса с последующим культивированием посевов в CO₂-инкубаторе для микроаэрофилов или в термостате при температуре 37 °C для аэробных микроорганизмов. Чашки со средами Чапека и Сабуро инкубировали при температуре 28 °C. После 3 суток инкубации в термостате чашки дополнительно инкубировали при комнатной температуре до 14 суток. Выросшие колонии идентифицировали методом масс-спектрометрии MALDI-ToF на приборе MALDI Biotyper Microflex LT (Bruker Daltonics GmbH & Co. KG., Германия), подсчёт колоний производили с помощью ПО Colony Count для прибора BIOMIC V3 (Giles Scientific Inc., США).

Метагеномное исследование выполняли на секвенаторе Illumina MiSeq DX (Illumina Inc., США) с использованием картриджа V2-500 и программных инструкций Local Run Manager 16S Metagenomics Analysis Module v2. Библиотеки для секвенирования получали согласно методике, описанной в инструкции 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation. Illumina, Inc. 2014. Part 15044223 Rev. Для подготовки библиотек использовали праймеры и индексы из набора Nextera XT Index Kit.

Агрохимический анализ проводили на базе ФГБУ «САС «Самарская» в соответствии с ГОСТами для каждого из измеряемых параметров: pH солевой вытяжки (ГОСТ 26483-85); гумус, % (ГОСТ 26483-85); содержание подвижного фосфора, мг/кг почвы и содержание обменного калия, мг/кг почвы (ГОСТ Р 54650-2011); содержание нитратного азота, мг/кг почвы и содержание аммонийного азота, мг/кг почвы (ГОСТ Р 53219-2008).

При оценке и интерпретации результатов основными целевыми показателями считали урожайность и содержание гумуса в почве. Анализ концентрации микробной биомассы и базального дыхания проводили на базе Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино, Московская область).

В ходе исследований выполнили анализ основных микроорганизмов, выделенных при культурном и метагеномном анализе. Проанализировали структуру микробиома. Отобрали основные индикаторные микроорганизмы, которые могут быть использованы как для оценки состояния почв, так и для решения конкретных биологических задач.

Наряду со стандартным анализом индексов альфа и бета-разнообразия предложены следующие метаболические индексы: аэробный ($AЭ/(AЭ+МА+АН)$), анаэробный ($АН/(AЭ+МА+АН)$),

микроаэрофильный ($МА/(AЭ+МА+АН)$), аэробно/анаэробный, аэробно/микроаэрофильный, микроаэрофильно/анаэробный. Для расчета индексов для каждой среды фиксировалось значение КОЕ в определенных условиях, и затем значение индекса вычислялось по одной из формул (табл 1).

Таблица 1. Формулы для расчета метаболических индексов

Индекс	Формула
Аэробный (Инд_АЭ)	$AЭ/(AЭ+МА+АН)$
Анаэробный (Инд_АН)	$АН/(AЭ+МА+АН)$
Микроаэрофильный (Инд_МА)	$МА/(AЭ+МА+АН)$
Аэробно/ анаэробный	$AЭ/АН$
Аэробно/ микроаэрофильный	$AЭ/МА$
Микроаэрофильно/анаэробный	$МА/АН$

Для расчета суммарного индекса находили среднее значение. Рассчитывали дисперсию, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, ошибку среднего. Ниже представлен пример расчета индексов для среды Редди для участка поля G70 с зеленым NDVI для слоя 0...10 см (табл. 2). Для оценки корреляции использовался коэффициент корреляции гху Пирсона.

Таблица 2. Пример расчета индексов для среды агар Редди для участка поля G70 с зеленым NDVI для слоя 0...10 см

	АЭ (КОЕ)	МА (КОЕ)	АН (КОЕ)	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
1	1488	2928	1205	0,26	0,52	0,21	1,23	0,51	2,43
2	1887	1116	270	0,58	0,34	0,08	6,99	1,69	4,13
3	680	1090	1371	0,22	0,35	0,44	0,50	0,62	0,80
4	988	931	519	0,41	0,38	0,21	1,90	1,06	1,79
5	1148	930	636	0,42	0,34	0,23	1,81	1,23	1,46
Корреляция Смис	-0,96	-0,06	0,74	-0,85	0,03	0,93	-0,93	-0,76	-0,97
Корреляция Гумус	-0,79	0,30	0,80	-0,92	0,41	0,78	-0,99	-0,92	-0,86
Макс	1887,00	2928,00	1371,00	0,58	0,52	0,44	6,99	1,69	4,13
Мин	680,00	930,00	270,00	0,22	0,34	0,08	0,50	0,51	0,80
Ср	1238,20	1399,00	800,20	0,38	0,39	0,24	2,49	1,02	2,12
Дисперсия	216416,20	738099,00	219205,70	0,02	0,01	0,02	6,65	0,23	1,61
Среднее кв.от.	688,88	957,30	529,08	0,18	0,15	0,17	2,35	0,51	1,35
Коеф-нт вар.	0,56	0,68	0,66	0,48	0,40	0,71	0,94	0,50	0,64
Ошибка ср.	137,78	191,46	105,82	0,04	0,03	0,03	0,47	0,10	0,27

Исследование также включало анализ влияния обработки на количество и биоразнообразие микроорганизмов. Для этого выполняли подсчет общего количества КОЕ и видов для каждой точки, каждого слоя и условий культивирования. Для каждой из точек определяли видовое разнообразие с учетом потенциально полезных и патогенных микроорганизмов. Наряду с этим выполняли оценку агрохимических показателей (содержания углерода, азота, фосфора, калия, pH).

Статистический анализ проводили с использованием программы StatTech v. 4.6.1 (ООО "Статтех", Россия). Количественные показатели оценивали на предмет соответствия нормальному распределению

с помощью критерия Шапиро-Уилка. Количественные показатели, имеющие нормальное распределение, описывали с помощью средних арифметических величин (M) и стандартных отклонений (SD), границ 95 % доверительного интервала (95% ДИ). В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывали с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1 – Q3). Категориальные данные описывали с указанием абсолютных значений и процентных долей. 95 % доверительные интервалы для процентных долей рассчитывали по методу Клоппера-Пирсона. Сравнение двух групп по количественному показателю, имеющему нормальное распределение, при неравных дисперсиях

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

выполняли с помощью t-критерия Уэлча. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Корреляционный анализ и анализ главных компонент выполняли с использованием программного обеспечения RStudio 2025.05.0 build 496 (Posit Software, PBC), R 4.4.2.

Результаты

Культуромный анализ позволяет проводить количественную оценку КОЕ при посеве в определенных условиях. В сельскохозяйственной микробиологии принято, что количество аэробных, анаэробных и микроаэрофильных микроорганизмов отражает направление метаболических процессов в почве, что может являться индикатором ее состояния.

В связи с этим в настоящем исследовании ставилась задача изучить метаболические индексы (аэробный ($АЭ/(АЭ+МА+АН)$), анаэробный ($АН/(АЭ+МА+АН)$), микроаэрофильный ($МА/(АЭ+МА+АН)$), аэробно/анаэробный, аэробно/микроаэрофильный, микроаэрофильно/анаэробный) и проанализировать их связь с такими показателями плодородия, как урожайность, содержание гумуса и углерод микробной биомассы.

В рамках исследования: 1) подсчитано общее количество КОЕ для сред Уриселект, Кровяной агар, агар Редди, Бруцелла агар при культивировании в аэробных, микроаэрофильных и анаэробных условиях; 2) проведен корреляционный анализ индексов с показателями урожайности, содержания гумуса, углерода микробной биомассы для поиска прогностически ценных показателей; 3) проведен анализ целевых показателей продуктивности поля с учетом разделения по зонам NDVI; 4) проведен качественный анализ выделенных таксонов и рассчитаны индексы биоразнообразия на основании культуромного и метагеномного анализа образцов.

В рамках первого этапа исследования была проведена оценка прогностической значимости метаболических индексов на основании показателей корреляции с содержанием гумуса, урожайности, углерода микробной биомассы.

Ниже приведены таблицы по оценке значений корреляции Пирсона для индексов с показателями гумуса (C), углерода микробной биомассы (Cmic) и урожайности (табл. 3).

Таблица 3. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями без дифференциации по слоям и индексам NDVI

Корреляция Гумус		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0,14	0,02	0,04	0,10	-0,08	-0,03	0,11	0,14	0,04
	БРУЦ	0,26	0,13	-0,03	0,19	0,11	-0,24	0,23	0,12	0,24
	КР_АГ	0,19	0,13	0,10	0,10	0,05	-0,13	0,06	0,07	0,04
	РЕДДИ	-0,07	0,02	0,06	-0,13	0,05	0,09	0,05	-0,15	0,09
	РОГОЗА	0,22	0,00	0,00	0,24	-0,13	-0,07	0,23	-0,09	-0,04
Корреляция урожайность		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0,12	-0,20	-0,15	0,34	-0,18	-0,24	0,34	0,31	0,00
	БРУЦ	-0,04	-0,02	-0,26	0,17	0,25	-0,33	0,39	-0,08	0,46
	КР_АГ	0,20	0,12	0,02	0,12	0,10	-0,20	0,33	-0,04	0,33
	РЕДДИ	-0,09	-0,17	-0,39	0,24	0,15	-0,33	0,32	0,14	0,34
	РОГОЗА	0,19	0,32	0,00	-0,15	0,21	-0,10	0,11	-0,04	0,27
Корреляция Cmic		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0,20	-0,14	-0,15	0,28	-0,15	-0,20	0,30	0,26	0,07
	БРУЦ	0,16	-0,03	-0,26	0,35	0,16	-0,42	0,43	0,20	0,44
	КР_АГ	0,15	0,01	0,02	0,18	0,00	-0,17	0,15	0,13	0,09
	РЕДДИ	-0,01	-0,13	-0,07	0,06	-0,02	-0,04	0,24	0,01	0,21
	РОГОЗА	0,19	-0,07	0,00	0,23	-0,15	-0,03	0,20	-0,02	-0,06

АЭ – количество КОЕ аэробов; МА – количество КОЕ микроаэрофилов; АН – количество КОЕ анаэробов; Инд_АЭ – аэробный индекс ($АЭ/(АЭ+МА+АН)$), Инд_МА – микроаэрофильный индекс ($МА/(АЭ+МА+АН)$); Инд_АН – анаэробный индекс ($АН/(АЭ+МА+АН)$); АЭ/АН – аэробно/анаэробный индекс; АЭ/МА – аэробно/микроаэрофильный индекс; МА/АН – микроаэрофильно/анаэробный индекс; УРИ – Уриселект; БРУЦ – Бруцелла агар; КР_АГ – Кровяной агар; РЕДДИ – агар Редди; РОГОЗА – агар Рогоза.

При недифференцированной оценке корреляции показателей урожайности, углерода и Cmic с индексами и абсолютным количеством КОЕ без учета полей и слоев (мульча, 10 см, 20 см) коэффициент корреляции не превышал 0,5. Максимальные значения выявлены для микроаэрофильно-анаэробного коэффициента МА/АН для среды Бруцелла агар – 0,46; 0,44 – для урожайности и углерода микробной биомассы соответственно. В связи с этим

следующим этапом исследования станет оценка качественного состава микроаэрофилов и анаэробов при посеве на среду Бруцелла агар для их структуры и оценки роли в формировании почвенного плодородия.

Далее (табл. 4, 5, 6) был проведен дифференцированный анализ по слоям, при котором значения корреляции Пирсона в ряде случаев приближались к достоверным (0,6...0,8).

Таблица 4. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями при дифференциации по слоям: мульча

Мульча										
Корреляция гумус		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.09	-0.10	-0.27	0.14	-0.01	-0.21	0.17	0.16	0.17
	БРУЦ	0.54	0.14	0.19	0.31	-0.10	-0.14	0.27	0.24	0.15
	КР_АГ	0.40	0.25	0.00	-0.01	-0.13	0.13	-0.04	-0.03	-0.06
	РЕДДИ	0.06	0.01	-0.41	0.12	0.21	-0.31	0.31	0.10	0.37
	РОГОЗА	0.47	0.56	0.25	-0.10	0.13	-0.06	0.09	-0.09	0.17
Корреляция урожайность		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.40	-0.09	-0.42	0.42	-0.32	-0.26	0.42	0.36	-0.11
	БРУЦ	0.16	-0.03	-0.14	0.03	0.21	-0.20	0.33	-0.18	0.36
	КР_АГ	0.64	0.10	0.00	0.49	-0.20	-0.33	0.45	0.38	0.16
	РЕДДИ	0.34	0.45	0.37	-0.01	0.01	0.00	0.15	0.01	0.15
	РОГОЗА	0.15	0.09	0.25	-0.11	-0.24	0.31	-0.13	0.30	-0.16
Корреляция Cmic		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.28	-0.11	-0.42	0.34	-0.07	-0.45	0.41	0.30	0.24
	БРУЦ	0.29	-0.23	-0.14	0.57	-0.21	-0.23	0.51	0.40	0.27
	КР_АГ	0.55	0.20	0.09	0.35	-0.07	-0.30	0.32	0.24	0.16
	РЕДДИ	0.21	0.29	0.52	-0.14	-0.11	0.26	-0.09	-0.05	-0.12
	РОГОЗА	0.13	0.05	0.22	-0.10	-0.20	0.26	-0.05	0.22	-0.11

Для мульчи наиболее высокие значения корреляции Пирсона отмечаются для количества КОЕ аэробов и 1) гумуса для сред Бруцелла (0,54), Кровяной агар (0,4), Рогоза (0,47); 2) урожайности для сред Ури-селект (0,4), Кровяной агар (0,64); 3) углерода микробной биомассы для среды Кровяной агар (0,55). При этом несмотря на высокую корреляцию показателей урожайности, гумуса и углерода микробной биомассы (r Пирсона > 0,8) отмечаются противоположные тенденции для различных слоев для различных сред. Так, к примеру, для среды агар Редди отмечается отрицательная корреляция с гумусом ($r = -0,6$)

и положительная корреляция ($r=0,44$). Это свидетельствует о необходимости дальнейшей дифференцировки (по индексу NDVI) для получения достоверных различий. Единственной средой, для которой отмечается положительная корреляция общего количества КОЕ аэробов с показателями гумуса, урожайности и углерода микробной биомассы, стала среда Кровяной агар. В связи с этим на следующем этапе исследования выполнили оценку качественного состава аэробов при посеве на среду Кровяной агар для определения их структуры и оценки роли в формировании почвенного плодородия.

Таблица 5. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями с дифференциацией по слоям: 0...10 см

0...10 см										
Корреляция Гумус		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.34	0.16	0.25	0.14	-0.11	-0.04	0.21	0.20	0.14
	БРУЦ	0.14	0.15	-0.31	0.14	0.38	-0.38	0.25	-0.01	0.37
	КР_АГ	0.06	0.09	-0.02	-0.05	0.17	-0.07	0.22	-0.22	0.29
	РЕДДИ	0.17	-0.01	-0.33	0.25	0.00	-0.22	0.34	0.22	0.31
	РОГОЗА	0.06	0.11	-0.18	-0.14	-0.02	0.16	-0.05	0.00	0.06
Корреляция урожайность		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.15	-0.12	0.04	0.48	-0.10	-0.39	0.39	0.40	0.07
	БРУЦ	0.21	0.25	-0.42	0.18	0.33	-0.38	0.48	-0.08	0.62
	КР_АГ	0.01	-0.01	-0.02	0.17	0.17	-0.31	0.22	0.06	0.21
	РЕДДИ	0.07	-0.36	-0.33	0.40	-0.29	-0.18	0.47	0.46	0.31
	РОГОЗА	0.26	-0.11	-0.18	0.47	-0.03	-0.43	0.46	-0.07	0.02
Корреляция Cmic		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
	УРИ	0.29	-0.08	0.04	0.37	-0.22	-0.16	0.34	0.38	0.10
	БРУЦ	0.27	0.31	-0.42	0.24	0.54	-0.59	0.46	-0.01	0.66
	КР_АГ	0.16	0.21	0.04	0.12	0.34	-0.38	0.22	0.01	0.30
	РЕДДИ	0.02	-0.04	-0.12	0.12	0.01	-0.11	0.23	0.10	0.23
	РОГОЗА	0.33	0.08	-0.24	0.43	0.11	-0.55	0.57	-0.20	0.21

Таблица 6. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями с дифференциацией по слоям: 10...20 см.

Корреляция		10...20 см								
		АЭ	МА	АН	Инд_АЭ	Инд_МА	Инд_АН	АЭ/АН	АЭ/МА	МА/АН
Корреляция Гумус	УРИ	0,00	-0,18	0,04	0,02	-0,15	0,14	-0,02	0,11	-0,17
	БРУЦ	0,64	0,56	0,34	0,78	0,76	0,47	0,55	0,70	0,52
	КР_АГ	0,24	0,13	0,15	0,55	0,39	-0,66	0,65	0,04	0,61
	РЕДДИ	-0,47	-0,52	-0,62	0,44	0,30	-0,53	0,48	0,16	0,45
	РОГОЗА	0,28	0,56	0,05	-0,06	0,47	-0,50	0,38	-0,33	0,52
Корреляция урожайность	УРИ	-0,21	-0,67	-0,18	0,18	-0,13	-0,10	0,24	0,29	0,00
	БРУЦ	0,40	0,32	0,06	0,76	0,82	0,23	0,62	0,58	0,72
	КР_АГ	0,02	-0,02	0,15	-0,15	-0,04	0,12	0,01	-0,03	-0,02
	РЕДДИ	-0,57	-0,19	-0,12	-0,33	0,26	0,14	-0,11	-0,46	0,11
	РОГОЗА	0,17	-0,09	0,05	0,11	-0,17	0,10	0,13	0,03	-0,05
Корреляция Cmic	УРИ	0,00	-0,40	-0,18	0,17	-0,19	-0,02	0,15	0,23	-0,08
	БРУЦ	0,45	0,36	0,06	0,68	0,61	0,05	0,67	0,55	0,61
	КР_АГ	-0,01	-0,12	0,25	-0,17	-0,21	0,28	-0,15	0,04	-0,20
	РЕДДИ	-0,51	-0,04	-0,02	-0,48	0,34	0,22	-0,25	-0,64	0,06
	РОГОЗА	0,18	-0,13	0,10	0,13	-0,23	0,16	0,06	0,03	-0,17

Максимальные значения коэффициента корреляции для слоя 0...10 см установлены для микроаэрофильно-анаэробного коэффициента МА/АН при посеве на среду Бруцелла агар (0,37; 0,62; 0,66) с показателями гумуса, урожайности и углерода микробной биомассы соответственно. В связи с этим следующим этапом исследования станет оценка качественного состава микроаэрофилов и анаэробов при посеве на среду Бруцелла агар для определения их структуры и оценки роли в формировании почвенного плодородия.

Максимальные значения коэффициента корреляции Пирсона для слоя 10...20 см выявлены для микроаэрофильно-анаэробного коэффициента МА/АН при посеве на среду Бруцелла агар (0,52; 0,72; 0,61) с

показателями гумуса, урожайности и углерода микробной биомассы соответственно. В связи с этим следующим этапом исследования станет оценка качественного состава микроаэрофилов и анаэробов на среде Бруцелла агар для определения их структуры и оценки роли в формировании почвенного плодородия.

При анализе показателей с дифференцировкой и по слоям, и по полям (с учетом красного и зеленого NDVI) степень корреляции значительно повышается ($r = 0,7-0,9$). При этом зачастую показатели для полей с зеленым и красным NDVI характеризовались противоположно направленной корреляцией, что может позволить использовать эти маркеры для оценки содержания гумуса и здоровья почв (табл. 7, 8, 9).

Таблица 7. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями с дифференциацией по слоям и индексам NDVI: мульча

Слой	Мульча									
Среда	УРИ		КР_АГ		РЕДДИ		РОГОЗА		БРУЦ	
NDVI	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green
АЭ	0,55	0,35	0,86	0,28	0,57	-0,50	-0,05	0,34	0,38	0,19
МА	-0,40	0,33	0,30	0,11	-0,14	0,68	-0,01	-0,11	0,26	-0,65
АН	0,71	-0,51	0,22	0,16	0,82	-0,03	0,34	0,36	0,01	-0,09
Инд_АЭ	0,55	0,31	0,44	0,15	0,32	-0,59	-0,82	0,60	0,31	0,45
Инд_МА	-0,67	0,10	-0,27	-0,02	-0,79	0,82	-0,36	-0,92	0,55	-0,45
Инд_АН	0,30	-0,68	-0,54	-0,04	0,36	-0,11	0,52	0,39	-0,66	-0,01
АЭ/АН	0,20	0,33	0,35	0,08	0,05	-0,09	-0,30	0,19	0,60	0,35
АЭ/МА	0,71	0,09	0,40	0,12	0,58	-0,89	0,51	0,83	-0,02	0,92
МА/АН	-0,64	0,81	0,27	0,01	-0,86	0,54	-0,13	-0,76	0,85	0,17

Таблица 8. Корреляция показателей гумуса (C), урожайности, углерода микробной биомассы (Cmic) с микробиологическими показателями с дифференциацией по слоям и индексам NDVI: 0...10 см

Слой	0...10 см									
Среда	УРИ		КР_АГ		РЕДДИ		РОГОЗА		БРУЦ	
NDVI	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green
АЭ	0,45	-0,03	0,22	0,38	-0,21	-0,79	0,68	0,49	0,75	0,17
МА	0,20	-0,14	0,49	0,38	0,43	0,30	0,27	0,17	0,46	0,36
АН	0,93	-0,66	0,57	0,00	-0,19	0,80	0,37	-0,92	0,24	-0,90
Инд_АЭ	-0,15	0,23	-0,33	0,35	-0,55	-0,92	0,35	0,78	0,72	0,37
Инд_МА	-0,37	0,00	0,95	0,66	0,52	0,41	-0,01	0,49	-0,19	0,82
Инд_АН	0,52	-0,61	-0,41	-0,48	-0,19	0,78	-0,52	-0,80	-0,86	-0,76
АЭ/АН	-0,45	0,31	0,12	0,30	-0,07	-0,99	0,64	0,64	0,81	0,39
АЭ/МА	0,30	0,19	-0,78	0,11	-0,61	-0,92	-0,15	0,09	0,63	-0,05
МА/АН	-0,31	0,44	0,54	0,35	0,49	-0,86	0,20	0,34	0,81	0,65

Таблица 9. Корреляция показателей гумуса (С) с микробиологическими показателями с дифференциацией по слоям и индексам NDVI: 10...20 см

Слой	10...20 см									
Среда	УРИ		КР АГ		РЕДДИ		РОГОЗА		БРУЦ	
NDVI	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green
АЭ	-0,65	0,24	-0,47	0,13	0,97	0,34	0,04	0,36	-0,06	0,04
МА	-0,11	-0,74	-0,30	-0,77	0,32	0,04	-0,62	-0,27	0,04	0,14
АН	0,55	0,26	0,74	0,51	-0,09	0,73	0,14	0,44	0,21	-0,24
Инд_АЭ	-0,93	0,25	-0,58	0,30	0,80	-0,04	0,31	0,29	-0,06	0,15
Инд_МА	-0,17	-0,50	-0,46	-0,62	-0,16	-0,41	-0,75	-0,49	-0,16	0,18
Инд_АН	0,80	0,25	0,96	0,54	-0,69	0,81	0,46	0,36	0,13	-0,43
АЭ/АН	-0,89	0,17	-0,85	-0,40	0,72	-0,65	-0,04	0,09	0,09	0,38
АЭ/МА	-0,78	0,38	-0,17	0,52	0,68	0,25	0,63	0,40	0,04	-0,03
МА/АН	-0,73	-0,43	-0,94	-0,57	0,36	-0,85	-0,65	-0,39	-0,03	0,26

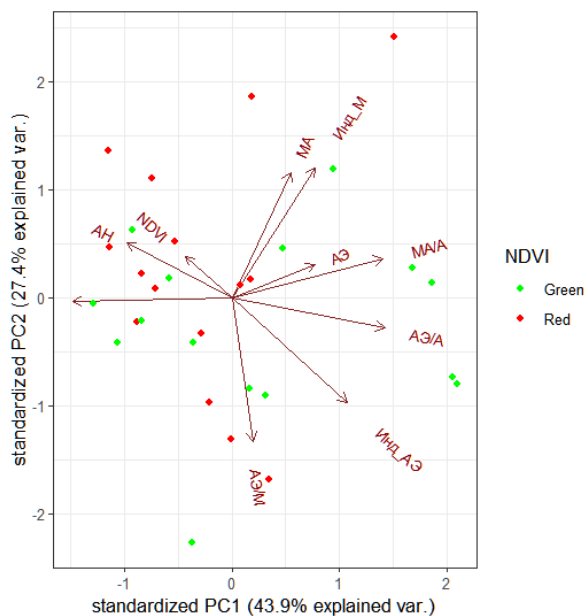


Рис. 2. Кровяной агар

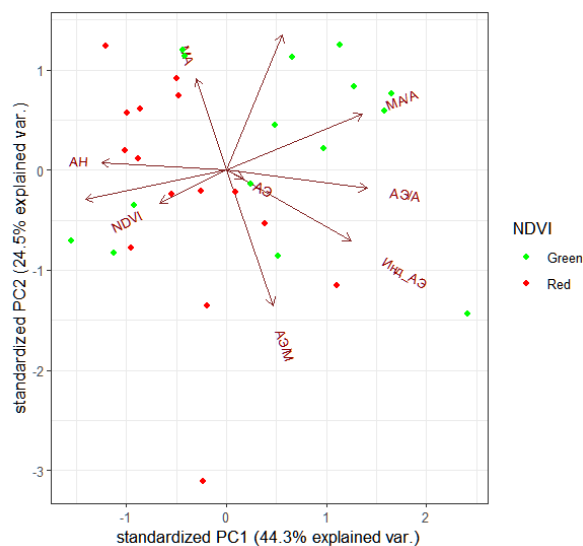


Рис 3. Бруцелла агар

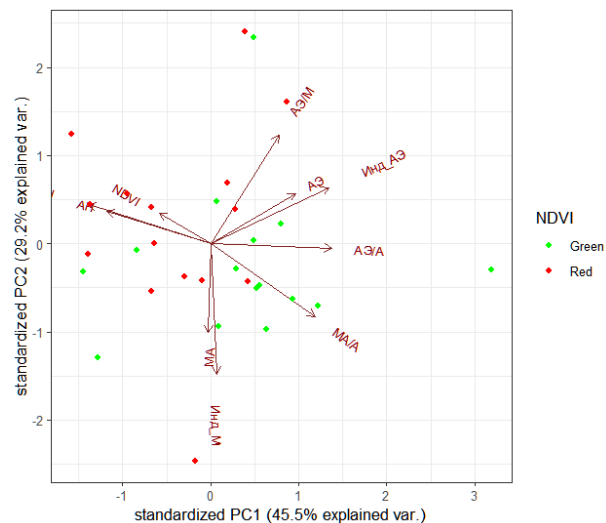


Рис. 4. Агар Редди

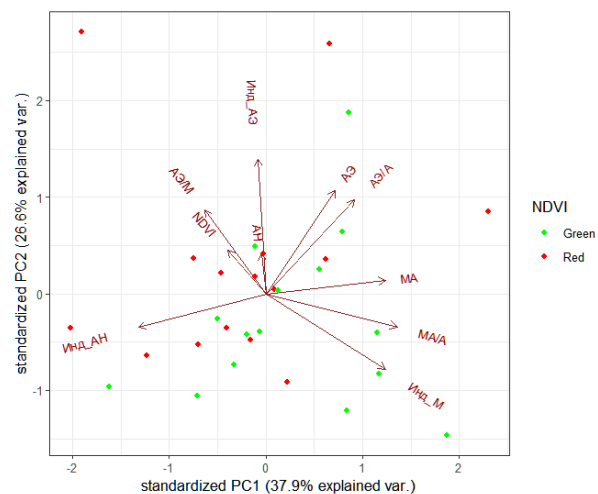


Рис 5. Рогоза агар

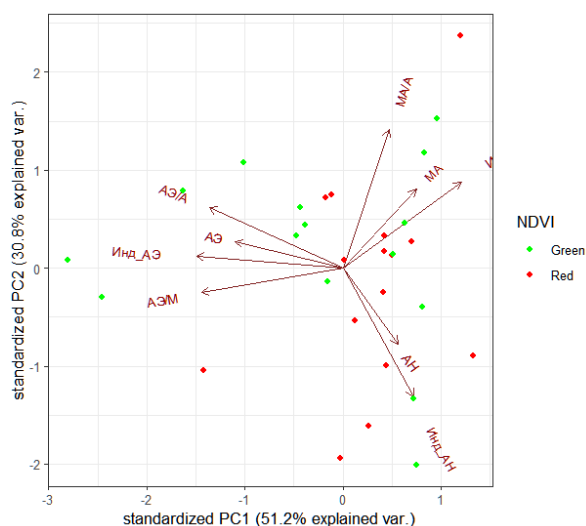


Рис. 6. Уриселект

При сравнении индексов и сред наиболее информативной является абсолютная разность между показателями для зеленого и красного NDVI. В соответствии с представленными данными такими свойствами обладает агар Редди. В рамках следующего этапа будет проводиться подробный видовой состав выделяемых МО для оценки их роли в обеспечении высокого почвенного плодородия.

Кроме того, для каждой из среды был проведен анализ главных компонент для соотнесения зеленого и красного NDVI. Выявлено, что при использовании среды Кровяной Агар с зеленым NDVI коррелировали индексы МА/АН, АЭ/АН; при использовании среды Бруцелла агар – индексы АЭ, МА/АН; при использовании среды агар Редди – индексы МА/АН, АН/АЭ, АЭ, МА, при использовании среды Рогоза агар – индексы МА, МА/АН; при использовании среды Уриселект – индексы АЭ, АЭ/АН, АЭ/МА (рис. 2-6).

Обсуждение

Сегодня мы становимся свидетелями серьезной эрозии и деградации почв, что ставит и нас, и будущие поколения перед угрозой продовольственного кризиса. Причиной этому стали традиционные аграрные практики, которые истощают запасы плодородия российского чернозема, с одной стороны, с другой стороны, систематическое нарушение стандартов и технологий усугубляет процесс. Такое нарушение вызвано, в первую очередь, резким падением цен на сельхозпродукцию, что вынуждает аграриев снижать затраты на восстановление сельхозземель. Наблюдаемая деградация приводит к снижению питательной ценности продуктов питания, а, следовательно, подрывает здоровье населения, снижает иммунитет и способствует необоснованному росту фармацевтического производства.

Одной из ключевых задач в этой области должно стать исследование и восстановление микробиоты почвы. Необходим комплексный подход к сбору, анализу и последующей коррекции микробиоты сельскохозяйственных почв с целью повышения их плодородия.

Полученные корреляции между метаболическими индексами и углеродом микробной биомассы (Cmic) согласуются с данными о высоких уровнях микробной биомассы и активности почвенных ферментов в высокопродуктивных почвах [23]. Однако наши результаты показывают, что сами абсолютные значения Cmic менее информативны, чем соотношения различных групп микроорганизмов, что подчеркивает важность функционального анализа микробиоты. Взаимосвязь между метаболическими индексами и содержанием гумуса указывает на то, что структура микробного сообщества влияет на процессы аккумуляции органического вещества. Это согласуется с выводами о том, что соотношение грибов и бактерий (F:B) связано с эффективностью секвестрации углерода [28]. Грибы, будучи более эффективными в депонировании углерода в виде устойчивых к разложению соединений, способствуют накоплению гумуса.

Результаты исследования имеют практическое значение для разработки стратегий управления почвами в условиях прямого посева. Brangari, Lonnard, Rousk (2022) показали, что минимизация обработки почвы способствует восстановлению микробного разнообразия, однако процессы восстановления различны для бактерий и грибов [26]. Наш подход позволяет дифференцировать эти процессы и оценивать эффективность переходных практик.

Важно отметить, что в условиях прямого посева с мульчированием растительных остатков, как в изученном хозяйстве, создаются благоприятные условия для развития микроаэрофилов и анаэробов в верхних слоях почвы. Это подтверждается высокими корреляциями метаболических индексов в слое мульчи. По сравнению с традиционной обработкой почвы прямой посев, как правило, способствует увеличению общего разнообразия бактерий и биомассы в почве, особенно в поверхностных слоях, за счет сохранения органических веществ и остатков, которые способствуют росту микроорганизмов. Однако влияние на содержание аэробных бактерий в целом неоднозначно: их популяции часто увеличиваются благодаря стабильным источникам углерода, но за счет снижения аэрации создаются условия более благоприятные для анаэробов [39, 40].

Ограничением исследования является в первую очередь его география, поскольку исследование проведено на территории одного хозяйства (Самарская область, черноземы). Для валидации предложенных метаболических индексов необходимо проведение аналогичных исследований в различных почвенно-климатических условиях, что согласуется с рекомендациями Cusset et al. (2024) о необходимости региональной стандартизации микробиологических показателей [13].

Как подчеркивают Thiele-Bruhn et al. (2020), микробиологические показатели должны быть интегрированы с анализом почвенных функций, включая циклы питательных веществ и выбросы парниковых

газов [20]. Это требует дополнительных исследований функциональной активности выделенных микроорганизмов.

Проведённое исследование также подтверждает необходимость стандартизации методов отбора почвенных образцов. Использование транспортной среды (тиогликолевая среда) в полевых условиях позволило сохранить как аэробные, так и анаэробные микроорганизмы, что соответствует рекомендациям Семенова, Семеновой (2018) о минимизации агрессивного воздействия на микробные сообщества при сборе образцов [16].

Метаболические индексы, рассчитанные на основе культурального анализа на расширенном перечне сред, могут служить информативными индикаторами здоровья почв. Особенно перспективны индексы МА/АН и аэробный индекс при посеве на среду Бруцелла агар. Однако для практического применения этих показателей необходима дальнейшая валидация в различных почвенно-климатических условиях и интеграция с другими методами оценки функционального состояния почв.

Накопленная коллекция культур может быть использована для разработки биопрепаратов направленного действия для решения конкретной микроэкологической задачи.

Заключение

На фоне глобального почвенного кризиса необходим комплексный подход к сохранению плодородия почв, где одним из ключевых аспектов должна стать коррекция микробиома почв.

Существующие на сегодняшний день микробиологические индикаторы состояния почв недостаточно информативны и напрямую коррелируют с содержанием органического вещества почвы, в связи с чем фактически являются вторичными. Для грамотной диагностики и коррекции почвенной микробиоты необходим выбор индикаторов, которые бы отражали интегральное состояние почвы. Для поиска таких индикаторов предлагается рассматривать максимально приближенные территориально участки, которые отличаются по ряду критически важных показателей. В рамках настоящего исследования за такие параметры взяты урожайность, содержание гумуса, углерод микробной биомассы и индексы NDVI.

С учетом высокой стоимости и недоступности генетических методов для большинства сельхозпроизводителей, а также на фоне совершенствования методов культурального анализа предлагается пересмотреть подход к культуральному микробиологическому анализу почв.

В частности, в качестве количественных индикаторов предлагается введение следующих метаболических индексов: аэробный (АЭ/(АЭ+МА+АН)), анаэробный (АН/(АЭ+МА+АН)), микроаэрофильный (МА/(АЭ+МА+АН)), аэробно/анаэробный, аэробно/микроаэрофильный, микроаэрофильно/анаэробный.

В рамках проведенного исследования выявлено, что наибольшей чувствительностью обладают среды Бруцелла агар, Кровяной агар и Агар Редди, в частности, при оценке индекса МА/АН и аэробного индекса.

Необходимо дальнейшее изучение найденных закономерностей, а также проведение зеркальных исследований в различных почвенно-климатических условиях.

Литература

1. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability / D. Bhaduri, D. Sihi, A. Bhowmik, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 938481. doi: 10.3389/fmicb.2022.938481
2. Soil metabolomics - current challenges and future perspectives / R.W. Brown, M.K. Reay, F. Centler, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2024. Vol. 193. P. 109382. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109382
3. Allison S.D. Rethinking microbial carbon use efficiency in soil models // *Nat. Clim. Chang.* 2025. Vol. 15. P. 10-12. doi: 10.1038/s41558-024-02217-6
4. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health / P. Trivedi, J.E. Leach, S.G. Tringe, et al. // *Nat. Rev. Microbiol.* 2020. Vol. 18. P. 607-621. doi: 10.1038/s41579-020-0412-1
5. Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning / R.W. Brown, D.R. Chadwick, G.D. Bending, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 172. P. 108779. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2022.108779.
6. Superiority of native soil core microbiomes in supporting plant growth / Y. Zhou, D. Liu, F. Li, et al. // *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15. P. 6599. doi: 10.1038/s41467-024-50685-3
7. Nadeu E., van Dijk R., Hiller N. The soil microbiome: its contribution to soil health and One Health. Institute for European Environmental Policy, Brussels. 2023. P. 3-25. <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/12/The-Soil-Microbiome-ESAD-IEEP-2023.pdf> (дата обращения: 14.06.2025).
8. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi / S. Lutz, N. Bodenhausen, J. Hess, et al. // *Nat. Microbiol.* 2023. Vol. 8. P. 2277-2289. doi: 10.1038/s41564-023-01520-w
9. Promotion of plant growth in arid zones by selected *Trichoderma* spp. strains with adaptation plasticity to alkaline pH / J.P. Cabral-Miramontes, V. Olmedo-Monfil, M. Lara-Banda, et al. // *Biology*. 2022. No. 11. P. 81206. doi: 10.3390/biology11081206
10. Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges / G. Berg, D. Rybakova, D. Fischer, et al. // *Microbiome*. 2020. No. 8. P. 103. doi: 10.1186/s40168-020-00875-0
11. Global perspective of ecological risk of plastic pollution on soil microbial communities / B. Yang, L. Wu, W. Feng, et al. // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. P. 1468592. doi: 10.3389/fmicb.2024.1468592

12. Functional redundancy in soil microbial community based on metagenomics across the Globe / H. Chen, K. Ma, C. Lu, et al. // *Front. Microbiol.* 2022. Vol. 13. P. 878978. doi: 10.3389/fmicb.2022.878978
13. Which soil microbial indicators should be included in routine laboratory tests to support the transition to sustainable management of arable farming systems? A meta-analysis / E. Cusset, N. Bennegadi-Laurent, S. Recous, et al. // *Ecological Indicators.* 2024. Vol. 167. P. 112706. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112706
14. Culturomics- and metagenomics-based insights into the soil microbiome preservation and application for sustainable agriculture / E. Clagnan, M. Costanzo, A. Visca? et al. // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. *Front. Microbiol.* P. 1473666. doi: 10.3389/fmicb.2024.1473666
15. Editorial: rhizosphere interactions: root exudates and the rhizosphere microbiome / L. Wu, L. A. Weston, S. Zhu, et al. // *Front. Plant Sci.* 2023. 14. P. 1281010. doi: 10.3389/fpls.2023.1281010
16. Семенов А. М., Семенова Е. В. Практическое определение функциональной активности почвенной экосистемы. М.: Биологический факультет МГУ. 2018. 32 с. URL: <https://istina.ipmnet.ru/publications/book/88556084/> (дата обращения: 16.06.2025).
17. Duque-Zapata J., Muñoz J., Lopez-Alvarez D. Metagenomics approaches to understanding soil health in environmental research – a review // *Soil Science Annual.* 2023. Vol. 74. P. 1-11. doi: 10.37501/soilsa/163080
18. Semenov M. Metabarcoding and metagenomics in soil ecology research: achievements, challenges, and prospects // *Biology Bulletin Reviews.* 2021. Vol. 11. P. 403-417. doi: 10.1134/S2079086421010084.
19. Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е. Е. Андронов, Е. А. Иванова, Е. В. Першина, и др. // *Бюллетень Почвенного института.* 2015. № 80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-pokazateley-pochvennogo-mikrobioma-v-protsessah-svyazannyh-s-pochvoobrazovaniem-transformatsiyey-organicheskogo-veschestva-i> (дата обращения: 16.06.2025).
20. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment / S. Thiele-Bruhn, M. Schlöter, B.-M. Wilke, et al. // *Soil.* 2020. Vol. 6. P. 17-34. doi: 10.5194/soil-6-17-2020
21. Anikwe M.A.N., Ife K. The role of soil ecosystem services in the circular bioeconomy // *Front. Soil Sci.* 2023. No. 3. P. 1209100. doi: 10.3389/fsoil.2023.1209100
22. Белоусов А.А., Белоусова Е.Н., Бугаева А.В. Динамика углерода микробной биомассы и степень устойчивости чернозема обыкновенного в условиях перехода на минимизацию обработки // *Вестник КрасГАУ.* 2020. №5 (158). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-ugleroda-mikrobnoy-biomassy-i-stepen-ustoychivosti-chnozema-obyknovennogo-v-usloviyah-perehoda-na-minimizatsiyu-obrabotki>
23. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon / A.A.C. Lopes, D.M.G. Sousa, G.M. Chaer, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2013. Vol. 77, P. 461–472.
24. Microbiological indicators for assessing the effects of agricultural practices on soil health: A review / M.V. Semenov, A.D. Zhelezova, N.A. Ksenofontova, et al. // *Agronomy.* 2025. Vol. 15. No. 2. 335. doi: 10.3390/agronomy15020335
25. Chernov T., Zhelezova A. Динамика микробных сообществ почвы в различных диапазонах времени (обзор). // *Почвоведение.* 2020. №5. С. 560-600. doi: 10.31857/S0032180X20050044
26. Brangarí Albert C., Lyonard Blandine, Rousk Johannes. Soil depth and tillage can characterize the soil microbial responses to drying-rewetting // *Soil Biology and Biochemistry.* 2022. Vol. 173. P. 108806. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108806
27. Bailey V. L., Smith J. L., Bolton H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration // *Soil Biol. and Biochem.* 2008. Vol. 34. P. 997-1007.
28. Soil fungal: Bacterial ratios are linked to altered carbon cycling / A. A. Malik, S. Chowdhury, V. Schlager, et al. // *Frontiers in Microbiology.* 2016. Vol. 7. P. 1247. doi: 10.3389/fmicb.2016.01247
29. Малукова Л. С., Рогожина Е. В. Информативность численности сапротрофных бактерий, актиномицетов и микромицетов при оценке состояния агрогенно-измененных почв субтропической зоны России // *Проблемы агрохимии и экологии.* 2020. № 2. С. 42-50.
30. Wang X., Chi Yo., Song S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. URL=<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2024.1347745> (дата обращения: 11.05.2025). doi: 10.3389/fmicb.2024.1347745
31. Meshram S., Philbrick N.A., Adhikari T.B. Anaerobic soil disinfestation: a biologically-based solution for sustainable crop production // *Front. Hortic.* 2024. Vol. 3. P. 1436782 doi: 10.3389/fhort.2024.1436782
32. Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities / R. Sun, W. Li, W. Dong, et al. // *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. P. 00699. doi: 10.3389/fmicb.2018.00699
33. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization / M. Keiluweit, T. Wanzek, M. Kleber, et al. // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 1771. doi: 10.1038/s41467-017-01406-6
34. Impact of soil moisture regimes on greenhouse gas emissions, soil microbial biomass, and enzymatic activity in long-term fertilized paddy soil / A. Shah, J. Huang, T. Han, et al. // *Environ. Sci. Eur.* 2024. Vol. 36. P. 120. doi: 10.1186/s12302-024-00943-4

35. The distribution of aerobic bacteria in Chinese cropland is linked to the soil texture / X. Jiamin, W. Haonan, X. Chao, et al. // *Front Microbiol.* 2025. Vol. 19. P. 1541460. doi: 10.3389/fmicb.2025.1541460

36. Paul E. A., Serita D. F., *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Fifth ed. Elsevier, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128229415> (дата обращения: 14.06.2025).

37. The influence of anaerobic dechlorination on the aerobic degradation of PCBs in e-waste-contaminated soils in an anaerobic-aerobic two-stage treatment / S. Wang, J. Li, L. Jiang, et al. // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 844. P. 157195. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157195

38. Microbial necromass in soils – linking microbes to soil processes and carbon turnover / M. Kästner, A. Miltner, S. Thiele-Bruhn, et al. // *Front. Environ. Sci.* 2021. Vol. 9. P. 756378. doi: 10.3389/fenvs.2021.756378

39. Effect of no-tillage on soil bacterial and fungal community diversity: A meta-analysis, *Soil and Tillage Research* / Yü. Li, D. Song, Sh. Liang, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 204. P. 104721. doi: 10.1016/j.still.2020.104721

40. Conservation tillage practices affect soil microbial diversity and composition in experimental fields / M.H. Khan, H. Liu, A. Zhu, et al. // *Front Microbiol.* 2023. Vol. 14. P. 1227297. doi: 10.3389/fmicb.2023.1227297.

References

1. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability / D. Bhaduri, D. Sihi, A. Bhowmik, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 938481. doi: 10.3389/fmicb.2022.938481

2. Soil metabolomics - current challenges and future perspectives / R.W. Brown, M.K. Reay, F. Centler, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2024. Vol. 193. P. 109382. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109382

3. Allison S.D. Rethinking microbial carbon use efficiency in soil models // *Nat. Clim. Chang.* 2025. Vol. 15. P. 10-12. doi: 10.1038/s41558-024-02217-6

4. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health / P. Trivedi, J.E. Leach, S.G. Tringe, et al. // *Nat. Rev. Microbiol.* 2020. Vol. 18. P. 607-621. doi: 10.1038/s41579-020-0412-1

5. Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning / R.W. Brown, D.R. Chadwick, G.D. Bending, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2022. Vol. 172. P. 108779. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2022.108779.

6. Superiority of native soil core microbiomes in supporting plant growth / Y. Zhou, D. Liu, F. Li, et al. // *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15. P. 6599. doi: 10.1038/s41467-024-50685-3

7. Nadeu E., van Dijk R., Hiller N. The soil microbiome: its contribution to soil health and One Health. Institute for European Environmental Policy, Brussels. 2023. P. 3-25. [https://ieep.eu/wp-](https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/12/The-Soil-Microbiome-ESAD-IEEP-2023.pdf)

[content/uploads/2023/12/The-Soil-Microbiome-ESAD-IEEP-2023.pdf](https://ieep.eu/wp-content/uploads/2023/12/The-Soil-Microbiome-ESAD-IEEP-2023.pdf) (дата обращения: 14.06.2025).

8. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi / S. Lutz, N. Bodenhausen, J. Hess, et al. // *Nat. Microbiol.* 2023. Vol. 8. P. 2277-2289. doi: 10.1038/s41564-023-01520-w

9. Promotion of plant growth in arid zones by selected *Trichoderma* spp. strains with adaptation plasticity to alkaline pH / J.P. Cabral-Miramontes, V. Olmedo-Monfil, M. Lara-Banda, et al. // *Biology*. 2022. No. 11. P. 81206. doi: 10.3390/biology11081206

10. Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges / G. Berg, D. Rybakova, D. Fischer, et al. // *Microbiome*. 2020. No. 8. P. 103. doi: 10.1186/s40168-020-00875-0

11. Global perspective of ecological risk of plastic pollution on soil microbial communities / B. Yang, L. Wu, W. Feng, et al. // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. P. 1468592. doi: 10.3389/fmicb.2024.1468592

12. Functional redundancy in soil microbial community based on metagenomics across the Globe / H. Chen, K. Ma, C. Lu, et al. // *Front. Microbiol.* 2022. Vol. 13. P. 878978. doi: 10.3389/fmicb.2022.878978

13. Which soil microbial indicators should be included in routine laboratory tests to support the transition to sustainable management of arable farming systems? A meta-analysis / E. Cusset, N. Bennegadi-Laurent, S. Recous, et al. // *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 167. P. 112706. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112706

14. Culturomics- and metagenomics-based insights into the soil microbiome preservation and application for sustainable agriculture / E. Clagnan, M. Costanzo, A. Visca? et al. // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. P. 1473666. doi: 10.3389/fmicb.2024.1473666

15. Editorial: rhizosphere interactions: root exudates and the rhizosphere microbiome / L. Wu, L. A. Weston, S. Zhu, et al. // *Front. Plant Sci.* 2023. 14. P. 1281010. doi: 10.3389/fpls.2023.1281010

16. Semenov A. M., Semenova E. V. Practical determination of the functional activity of the soil ecosystem. Moscow: Biological Faculty of Moscow State University. 2018. 32 p. URL: <https://istina.ipmnet.ru/publications/book/88556084/> (date of access: 16.06.2025).

16. Duque-Zapata J., Muñoz J., Lopez-Alvarez D. Metagenomics approaches to understanding soil health in environmental research – a review // *Soil Science Annual*. 2023. Vol. 74. P. 1-11. doi: 10.37501/soilsa/163080

17. Semenov M. Metabarcoding and metagenomics in soil ecology research: achievements, challenges, and prospects // *Biology Bulletin Reviews*. 2021. Vol. 11. P. 403-417. doi: 10.1134/S2079086421010084

18. Analysis of soil microbiome indicators in processes associated with soil formation, transformation of organic matter and fine regulation of vegetation processes / E. E. Andronov, E. A. Ivanova, E. V. Pershina, et al. // *Bulletin of the Soil Institute*. 2015. No. 80. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-pokazateley-pochvennogo-mikrobioma-v-protsessah-svyazannyh-s-](https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-pokazateley-pochvennogo-mikrobioma-v-protsessah-svyazannyh-s)

pochvoobrazovaniem-transformatsiy-organicheskogo-veschestva-i (date of access: 16.06.2025).

18. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment / S. Thiele-Bruhn, M. Schloter, B.-M. Wilke, et al. // *Soil*. 2020. Vol. 6. P. 17-34. doi: 10.5194/soil-6-17-2020

19. Anikwe M.A.N., Ife K. The role of soil ecosystem services in the circular bioeconomy // *Front. Soil Sci.* 2023. No. 3. P. 1209100. doi: 10.3389/fsoil.2023.1209100

20. Belousov A.A., Belousova E.N., Bugaeva A.V. Dynamics of microbial biomass carbon and the degree of stability of ordinary chernozem under conditions of transition to minimization of cultivation // *Bulletin of KrasSAU*. 2020. No. 5 (158). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-ugleroda-mikrobnoy-biomassy-i-stepen-ustoychivosti-chernozema-obyknovennogo-v-usloviyah-perehoda-na-minimizatsiyu> (date of access: 11.05.2025).

20. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon / A.A.C. Lopes, D.M.G. Sousa, G.M. Chaer, et al. // *Soil Biol. Biochem.* 2013. Vol. 77, P. 461–472.

21. Microbiological indicators for assessing the effects of agricultural practices on soil health: A review / M.V. Semenov, A.D. Zhelezova, N.A. Ksenofontova, et al. // *Agronomy*. 2025. Vol. 15. No. 2. 335. doi: 10.3390/agronomy15020335

22. Isaev V. V. Agrotechnical weed control methods // *Plant Protection*. 1994. No. 3. P. 32-35. 22. Chernov T., Zhelezova A. Dynamics of soil microbial communities in different time ranges (review). // *Soil Science*. 2020. No. 5. P. 560-600. doi: 10.31857/S0032180X20050044

23. Brangarí Albert C., Lyonard Blandine, Rousk Johannes. Soil depth and tillage can characterize the soil microbial responses to drying-rewetting // *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 173. P. 108806. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108806

24. Bailey V. L., Smith J. L., Bolton H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration // *Soil Biol. and Biochem.* 2008. Vol. 34. P. 997-1007.

25. Soil fungal: Bacterial ratios are linked to altered carbon cycling / A. A. Malik, S. Chowdhury, V. Schlager, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 7. P. 1247. doi: 10.3389/fmicb.2016.01247

26. Malyukova L. S., Rogozhina E. V. Information content of the number of saprotrophic bacteria, actinomycetes and micromycetes in assessing the state of agrogenerally modified soils in the subtropical zone of Russia // *Problems of Agrochemistry and Ecology*. 2020. No. 2. P. 42–50.

27. Wang X., Chi Yo., Song S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review // *Front. Microbiol.* 2024. Vol. 15. URL=<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2024.1347745> (дата обращения: 11.05.2025). doi: 10.3389/fmicb.2024.1347745

28. Meshram S., Philbrick N.A., Adhikaru T.B. Anaerobic soil disinfestation: a biologically-based solution for sustainable crop production // *Front. Hortic.* 2024. Vol. 3. P. 1436782 doi: 10.3389/fhort.2024.1436782

29. Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities / R. Sun, W. Li, W. Dong, et al. // *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. P. 00699. doi: 10.3389/fmicb.2018.00699

30. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization / M. Keiluweit, T. Wanzek, M. Kleber, et al. // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 1771. doi: 10.1038/s41467-017-01406-6

31. Impact of soil moisture regimes on greenhouse gas emissions, soil microbial biomass, and enzymatic activity in long-term fertilized paddy soil / A. Shah, J. Huang, T. Han, et al. // *Environ. Sci. Eur.* 2024. Vol. 36. P. 120. doi: 10.1186/s12302-024-00943-4

32. The distribution of aerobic bacteria in Chinese cropland is linked to the soil texture / X. Jiamin, W. Haonan, X. Chao, et al. // *Front Microbiol.* 2025. Vol. 19. Vol. 16. P.1541460. doi: 10.3389/fmicb.2025.1541460

33. Paul E. A., Serita D. F., *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Fifth ed. Elsevier, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128229415> (дата обращения: 14.06.2025).

34. The influence of anaerobic dechlorination on the aerobic degradation of PCBs in e-waste-contaminated soils in an anaerobic-aerobic two-stage treatment / S. Wang, J. Li, L. Jiang, et al. // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 20. Vol. 844. P. 157195. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157195

35. Microbial necromass in soils – linking microbes to soil processes and carbon turnover / M. Kästner, A. Miltner, S. Thiele-Bruhn, et al. // *Front. Environ. Sci.* 2021. Vol. 9. P. 756378. doi: 10.3389/fenvs.2021.756378

36. Effect of no-tillage on soil bacterial and fungal community diversity: A meta-analysis, *Soil and Tillage Research* / Yü. Li, D. Song, Sh. Liang, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 204. P.104721. doi: 10.1016/j.still.2020.104721

37. Conservation tillage practices affect soil microbial diversity and composition in experimental fields / M.H. Khan, H. Liu, A. Zhu, et al. // *Front Microbiol.* 2023. Vol. 14. P. 1227297. doi: 10.3389/fmicb.2023.1227297.

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-27-34

УДК:633.289:631.527

Использование комплексного числового показателя для выделения ценного исходного материала в селекции житняка гребневидного

М. В. Деревянникова✉, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник

К. А. Катков, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

В. В. Чумакова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующая отделом «Селекция и первичное семеноводство кормовых и лекарственных трав»

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр»

356241, г. Михайловск, Ставропольский край, ул. Никонова 49

✉sotnikovam6031983@mail.ru

Резюме. Исследования посвящены поиску комплексно ценных коллекционных образцов житняка гребневидного для определения стратегии селекционной работы с культурой при создании нового исходного материала и высококонкурентных сортов. Впервые предложен новый подход для обработки полученного опытного материала при помощи комплексного числового показателя (КЧП) для выделения из экспериментального коллекционного материала высокоресурсных образцов с комплексом хозяйственно-ценных признаков и свойств. Цель исследований – оценить коллекционный материал образцов житняка гребневидного в количестве 43 единиц разнообразного эколого-географического происхождения одновременно по 12 хозяйственно ценным показателям с использованием комплексного числового показателя. В качестве стандарта выбран сорт житняка гребневидного Викрав. Работа выполнена на экспериментальных полях ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ» в севообороте отдела селекции и первичного семеноводства кормовых и лекарственных трав. Почвы опытного участка – суглинистые черноземы с малым (4,0...4,5) содержанием гумуса. Гидротермический коэффициент 1,1...1,3. В период вегетации относительная влажность воздуха варьируется от 47 до 79 %. Представленный алгоритм формирования комплексного показателя ценности коллекционных образцов, изучаемых в однократной повторности, позволяет провести оценку исходного селекционного материала для использования в дальнейшей работе. При этом выявлены наиболее значимые показатели для формирования продуктивности кормовой массы и семян житняка гребневидного, установлена взаимозависимость между изученными параметрами. По итогам исследований при помощи комплексного числового показателя по четырем годам пользования травостоем были выделены по комплексу хозяйственно ценных признаков для дальнейшего использования в селекционной практике высокоресурсные образцы житняка гребневидного: дикорастущие из Казахстана (К-52379 и К-52382), из Челябинской области (К- 51798), сорта Павловский-12 (К-27880), Батыр (К- 47346), Дамсинский степной (К- 51663) и Петровский (К- 50974), а также селекционные образцы №№ 1/2-18, 3/2-18, 4/2-18, 6/2- 18.

Ключевые слова: житняк, селекция, образец, признак, комплексный числовой показатель, эффективность.

Для цитирования: Деревянникова М. В., Катков К. А., Чумакова В. В. Использование комплексного числового показателя для выделения ценного исходного материала в селекции житняка гребневидного // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 27-34. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-27-34

Using a complex numerical indicator to identify valuable source material in crested wheatgrass breeding

M. V. Derevyannikova, K. A. Katkov, V. V. Chumakova

Federal State Budgetary Scientific Institution North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center

356241, Mikhailovsk, Stavropol Krai, Nikonov St., 49

✉sotnikovam6031983@mail.ru

Abstract. The study is devoted to the search for comprehensively valuable collection samples of crested wheatgrass to determine a breeding strategy for the crop when creating new source material and highly competitive varieties. A new approach to processing the obtained experimental material using a complex numerical indicator (CNI) is proposed for the first time to isolate high-resource samples with a range of economically valuable traits and properties from the experimental collection material. The objective of the study was to evaluate the collection material of 43 crested wheatgrass samples of diverse ecological and geographical origins simultaneously for 12 economically valuable indicators using a complex numerical indicator. The crested wheatgrass variety Vikrav was selected as the standard. The work was carried out on the experimental fields of the North Caucasus Federal Scientific Center in the crop rotation of the Department of Breeding and Primary Seed Production of Forage and Medicinal Grasses. The soils of the experimental plot are loamy black soils with

a low (4.0-4.5) humus content. The hydrothermal coefficient is 1.1-1.3. During the growing season, relative air humidity ranges from 47 to 79%. The presented algorithm for generating a comprehensive value indicator for collection samples studied in a single replicate allows to evaluate initial breeding material for usage in further work. The most significant parameters for development of forage and seed productivity of crested wheatgrass were identified and the interdependencies between the studied parameters were established. Based on the results of research using a complex numerical indicator for four years of grass stand use, high-resource samples of crested wheatgrass were identified based on a set of economically valuable traits for further use in breeding practice: wild-growing samples from Kazakhstan (K-52379 and K-52382), from Chelyabinsk region (K-51798), the varieties Pavlovsky-12 (K-27880), Batyr (K-47346), Damsinsky stepnoy (K-51663) and Petrovsky (K-50974), as well as breeding samples No. 1/2-18, 3/2-18, 4/2-18, 6/2-18.

Keywords: wheatgrass, breeding, samples, trait, complex numerical indicator, efficiency.

For citation: Derevyannikova M. V., Katkov K. A., Chumakova V. V. Using a complex numerical indicator to identify valuable source material in crested wheatgrass breeding // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 27-34 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-27-34

Введение

Основная задача современной селекции многолетних трав для полевого и пастбищного травосеяния во всех зонах РФ – создание высококачественных сортов, используемых на зеленый корм, сено и выпас, обеспечивающих высокую семенную продуктивность, приспособленных к почвенно – климатическим условиям зоны возделывания [1]. Сорта многолетних трав должны отличаться быстрым отрастанием весной и после укосов, устойчивостью к вытаптыванию, долголетием и высокой конкурентоспособностью в травосмесях по отношению к другим видам [2]. Для сенокосного и пастбищного травосеяния необходимы высокопродуктивные сорта, устойчивые к длительному использованию, адаптированные к землям различного типа, а также способных расти на малопродуктивных, песчаных, глинистых и засоленных почвах [3]. Среди широко возделываемых многолетних злаковых трав выделяется житняк гребневидный [4]. В Ставропольском крае накоплен довольно широкий опыт использования житняка гребневидного для восстановления и улучшения старо-возрастных посевов, отраженный в «Системе кормопроизводства Ставропольского края» [5]. В ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ» на сегодняшний день сельскохозяйственному производству предложен высокоурожайный сорт житняка гребневидного Викрав. Сорт обладает довольно стойким иммунитетом, устойчивостью к неблагоприятным почвенно-климатическим факторам, может возделываться на засоленных, переувлажненных, мочаковых и песчаных почвах, характеризуется высокими противозерозийными свойствами [6]. Однако, в связи с резко меняющимися погодными условиями и нестабильными климатическими факторами Центрального Предкавказья, новыми тенденциями развития отрасли животноводства сельскохозяйственному производству требуются современные, более урожайные и адаптивные к местным условиям высококачественные сорта [7, 8]. При создании новых сортов этой многолетней культуры весьма важно уже на первых этапах работы выделить комплексно ценные образцы для определения стратегии дальнейшей селекционной работы [9, 10]. Оценка коллекционного материала, с чего обычно начинается селекционный процесс с кормовыми травами, связана с трудностями выявления на

первых этапах комплексно ценных исходных форм. Закладка коллекционного питомника обычно проводится в однократной повторности из-за ограниченного количества семян получаемого материала. Использование стандартного метода влечет за собой большую трудоемкость проведения эксперимента.

В наших исследованиях была поставлена задача оценки коллекционных образцов житняка гребневидного разнообразного эколого-географического происхождения как по отдельным хозяйственно ценным признакам, так и, что более важно, по выделению образцов с комплексом ценных признаков. Применение метода единого комплексного числового показателя (КЧП), учитывающего одновременно более десяти изученных признаков, позволило ранжировать коллекционные образцы по четырем годам пользования травостоем. В данной работе были исследованы 12 признаков, определяющих продуктивность кормовой массы и семян житняка гребневидного.

Цель исследований – создать алгоритм формирования комплексного числового показателя продуктивности образцов житняка гребневидного, включающего в себя наиболее значимые хозяйственно ценные признаки и выделить наиболее перспективные образцы для использования в дальнейшей селекционной работе.

Материалы и методы

Работа выполнена на экспериментальных полях ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ» в севообороте отдела селекции и первичного семеноводства кормовых и лекарственных трав.

Почвы опытного участка – суглинистые черноземы с малым (4,0...4,5) содержанием гумуса. Гидротермический коэффициент 1,1...1,3. В период вегетации относительная влажность воздуха варьировала от 47 до 79 %. Среднемесячная температура воздуха по данным АИС «Агроклимат, Ставрополь» за вегетационный период составляла 17,86 °C последние 30 лет (1985-2015).

В годы исследований количество выпавших осадков довольно сильно отличалось неравномерностью. По годам исследований теплообеспеченность в течение вегетационного периода была не стабильной. Неустойчивость климатических условий Ставропольского края позволило дать более полную оценку

изученного коллекционного материала, в том числе по устойчивости к засухе и отзывчивости на высокое количество осадков.

Коллекционный питомник житняка гребневидного заложен в 2017 г. За годы исследований получен полный анализ по 43 образцам разнообразного эколого-географического происхождения. В состав питомника был включен 31 образец из мировой коллекции ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (из них 20 дикорастущих образцов и 11 сортов) и генофонд из 12 образцов собственной селекции. В качестве стандарта в опыте использовали сорт житняка гребневидного Викрав.

Питомник закладывали вручную удлиненными деланками с учетной площадью 3 м² в однократной повторности. Стандарт высевали через каждые 4-6 номеров. По всем годам исследований проводили полные фенологические наблюдения, всем образцам дали оценку хозяйственно-ценных признаков и свойств (*Методические указания по селекции и первичному семеноводству многолетних трав* / М. А. Смурыгин, А. С. Новосёлова, М. И. Рубцов и др. // Рос. акад. с.-х. наук, Всерос. НИИ кормов им. В. Р. Вильямса. Москва: ВИК, 1985. 188 с.). Для определения структуры урожая пробные снопы анализировали в воздушно-сухом состоянии в лабораторных условиях [11, 12]. Для определения критерия существенности различий между изученными образцами при закладке коллекционного питомника в однократной повторности нами впервые был применен метод комплексного числового показателя (КЧП) на основе метода главных компонент (Principal Component Analysis- PCA) для расчета полученных данных на многолетних растениях. Для проведения математических вычислений применяли табличный процессор MS Excel, интегрированный математический пакет Matlab, имеющий большой набор встроенных функций, а также пакет статистической обработки данных IBM SPSS Statistics.

За 2018-2021 гг. исследований по результатам фенологических наблюдений и камеральных работ был получен большой объем экспериментального материала, статистическая обработка которого при однократной повторности в опыте представляла определенные сложности для выделения перспективных для селекции генотипов как по отдельным показателям продуктивности, так и по их комплексу. Нами была проведена работа по объединению наиболее значимых параметров эталонного сорта житняка гребневидного в единый комплексный показатель, для чего мы воспользовались математическими расчетами, которые достоверно подтвердили результативность исследований по каждому изученному коллекционному образцу.

Из большого числа изученных признаков и свойств для математической обработки были выделены 12 исходных параметров: 1) за первый параметр нами взята урожайность зеленой массы, кг/м²;

2) за второй параметр взят выход воздушно-сухого вещества (сено), кг/м²; 3) за третий – урожайность семян, кг/м²; 4) за четвертый – процент облиственности растений; 5) за пятый – показатель перезимовки, балл; 6) за шестой – показатель энергии весеннего отрастания растений, балл; 7) за седьмой – показатель поражаемости болезнями растений, балл; 8) за восьмой – показатель повреждаемости вредителями растений, балл; 9) за девятый параметр взят показатель устойчивости растений к полеганию, балл; 10) за десятый параметр взята высота травостоя в фазу выметывания соцветий, см; 11) за одиннадцатый параметр взята средняя длина колоса в фазу полного созревания семян, см; 12) за двенадцатый параметр – средняя ширина колоса в фазу полного созревания семян, см.

Расчеты комплексного числового показателя за 2018 г. проводили для 36 образцов, в связи с тем, что в первый год пользования травостоем 5 коллекционных образцов житняка гребневидного (деланки 37-41) не достигли укосной спелости [10]. В 2019-2021 гг. все изучаемые образцы житняка гребневидного дали полноценный урожай по всем изучаемым параметрам.

Последовательность действий для выделения наиболее перспективных для селекции коллекционных образцов житняка гребневидного включала следующие задачи: 1) сформировать матрицу исходных данных по наиболее ценным хозяйственным признакам; 2) построить числовой комплексный показатель (КЧП) с полной информацией об изученных признаках; 3) на основе полученного КЧП провести ранжирование образцов. Для формирования КЧП растений применяли метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [13, 14]. (*Нелинейный метод главных компонент. Режим доступа URL: <http://pca.narod.ru/> (дата обращения: 28.02.2025).*)

Главная концепция создания обобщенного числового показателя состоит в следующем. Метод главных компонент (PCA) используется для уменьшения числа переменных в исходных данных. Важно подчеркнуть, что перед применением метода PCA исходная матрица данных предварительно подвергается стандартизации с помощью следующего выражения [13]:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X}, \quad (1)$$

где Z_i – стандартизованное значение измеряемого параметра для i -го образца растений; X_i – исходное значение измеряемого параметра для i -го образца; $\bar{X}$ – среднее значение параметра; σ_X – среднее квадратичное отклонение (СКО) параметра.

В результате реализации метода PCA получаем матрицу нагрузок (A) размерностью $[n \times n]$, вектор собственных значений компонент (λ) размерностью n , а также матрицу счетов (PC) размерностью $[h \times n]$.

Здесь h – количество оцениваемых образцов растений в выборке, n – количество измеряемых параметров [8-10].

На следующем шаге осуществлялся выбор главных компонент на основе заданной доли объясненной дисперсии исходных характеристик. Обычно эта доля составляет не менее 80 %. Затем в полученном пространстве главных компонент определяется опорная точка MAX [13,16], которая представляет собой гипотетический (эталонный) образец с оптимальными значениями всех используемых параметров в рамках выборки [17].

На следующем этапе в пространстве главных компонент (PC) определяются координаты векторов, которые соответствуют каждому из оцениваемых коллекционных образцов житняка. Затем требуется определить степень близости этих векторов к заданной опорной точке MAX. Для этого вычисляются расстояния от концов векторов, описывающих каждый i -й образец, до точки MAX. В результате получают следующие значения (Зиновьев А.Ю. Визуализация многомерных данных. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. 180 с.). Таким образом получают величины D_i^{MAX} :

$$D_i^{\text{MAX}} = \sqrt{(PC_1^i - PC_1^{\text{MAX}})^2 + (PC_2^i - PC_2^{\text{MAX}})^2 + \dots + (PC_k^i - PC_k^{\text{MAX}})^2}, (i=1 \dots h) \quad (2)$$

Комплексный числовой показатель определяется как величина, обратная значению D_i^{MAX} [7, 12, 13]:

$$KP_i = 1/D_i^{\text{MAX}} \quad (3)$$

Чем выше значение KP_i , тем ближе в координатном пространстве главных компонент к точке MAX располагается точка S_i , характеризующая оцениваемый образец, а, следовательно, тем ближе к наилучшим значениям измеряемые параметры данного образца житняка гребневидного (рис. 1).

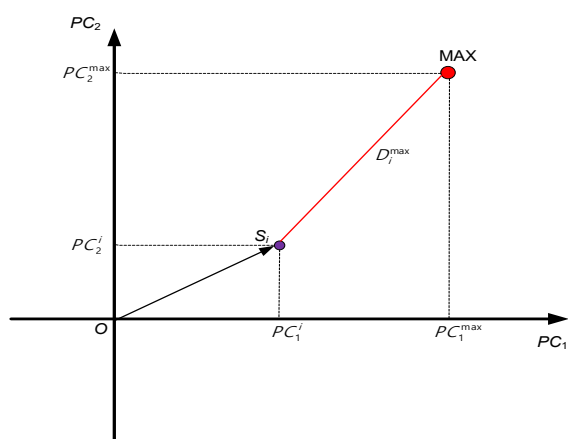


Рис. 1. Взаимное расположение опорной точки MAX и точки, характеризующей образец житняка гребневидного (S_i), в координатном пространстве главных компонент PC_1 и PC_2

Результаты

В качестве примера расчета комплексного показателя мы представляем ход и результаты расчета

полученных данных за 2018 г. По экспериментальным данным за 2019-2021 гг. были проведены аналогичные расчеты.

Реализация метода главных компонент в пакете MATLAB позволила получить матрицу нагрузок и матрицу счетов по всем 12-ти компонентам. Выделение главных компонент проводили на основании значения кумулятивной доли дисперсии исходных признаков, объясняемой компонентами. Объясненная дисперсия является показателем информативности компоненты. Графически эта доля объясненной дисперсии (The variance explained) представлена на рисунке 2.

Из анализа графика (рис. 2) видно, что первые 6 главных компонент объясняют 85 % дисперсии исходных измеренных параметров. Это дало основание для использования в дальнейших расчетах только первых 6 главных компонент [17].

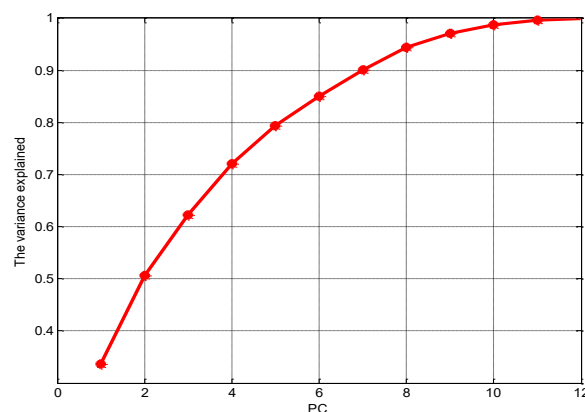


Рис. 2. Кумулятивная доля объясненной дисперсии по компонентам по результатам за 2018 г.

Представляет интерес расчет общностей, показывающих, какая часть дисперсии исходного признака объясняется выбранными главными компонентами. Другими словами, значения общностей позволяет определить наиболее информативные исходные признаки в выбранном пространстве главных компонент [13, 14].

Ниже, в таблице 1 представлены компонентные нагрузки исходных признаков по шести главным компонентам, а также рассчитанные значения общностей, вектор собственных значений (λ) и доля объясненной дисперсии признаков по каждой компоненте.

Ясно, что наиболее значимыми характеристиками в итоговой дисперсии, отражающей перспективность образцов, являются исходные показатели под номерами 8 (вредители) и 3 (масса семян).

На рисунке 3 ниже представлена визуализация матрицы нагрузок для выбранных шести главных компонент. Следует подчеркнуть, что на данном рисунке отображены абсолютные значения компонентных нагрузок, что дает возможность оценить степень вклада каждого исходного признака в соответствующую главную компоненту.

Таблица 1. Компонентные нагрузки, общности, собственные значения (2018 г.)

№ исходного признака	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6	Общности
	Компонентные нагрузки (a)						
1	0,439	0,033	-0,040	0,095	0,266	-0,356	0,402
2	0,417	0,086	0,030	0,146	0,324	-0,403	0,471
3	0,250	-0,017	0,037	0,532	-0,162	0,574	0,7031
4	-0,291	-0,120	0,216	0,377	0,467	0,125	0,5211
5	0,272	-0,414	-0,353	-0,098	-0,090	0,123	0,403
6	0,358	-0,331	-0,294	0,177	-0,052	-0,020	0,359
7	-0,156	0,365	-0,491	0,101	0,013	-0,161	0,436
8	0,064	0,360	-0,345	-0,311	0,559	0,443	0,859
9	-0,224	0,054	-0,342	0,580	0,101	-0,065	0,521
10	0,362	0,283	-0,018	-0,106	-0,170	0,302	0,342
11	0,076	0,559	0,017	0,198	-0,425	-0,152	0,562
12	0,262	0,195	0,511	0,101	0,191	0,092	0,423
Собственные значения (λ)							
	4,031	2,050	1,395	1,172	0,876	0,675	
Объясненная дисперсия (по компонентам)							
	33,591	17,081	11,628	9,764	7,296	5,629	

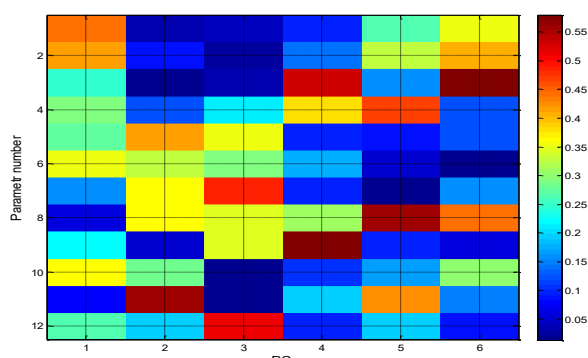


Рис. 3. Матрица нагрузок (по модулю) для выбранных шести главных компонент (2018 г.)

Анализ данных на рисунке 3 показывает, что в первую главную компоненту наибольший вклад вносят признаки: 1 (зеленая масса $\text{кг}/\text{м}^2$), 2 (выход сена $\text{кг}/\text{м}^2$), 6 (энергия весеннего отрастания, балл) и 10 (высота травостоя, см). Во вторую главную компоненту – признаки: 5 (перезимовка, балл) и 11 (длина колоса) параметры и т.д.

Далее идет расчет непосредственно комплексного числового показателя. Использование метода единого КЧП, учитывающего одновременно все 12 изученных признаков, позволило ранжировать коллекционные образцы по годам пользования травостоем (рис. 4). Стандарт на рисунке выделен красным цветом.

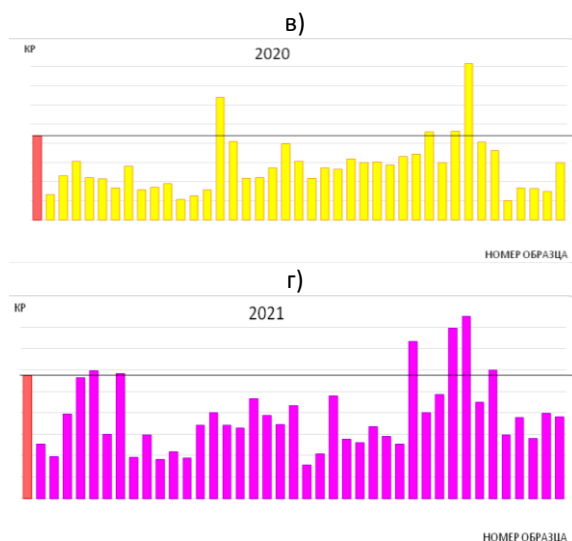
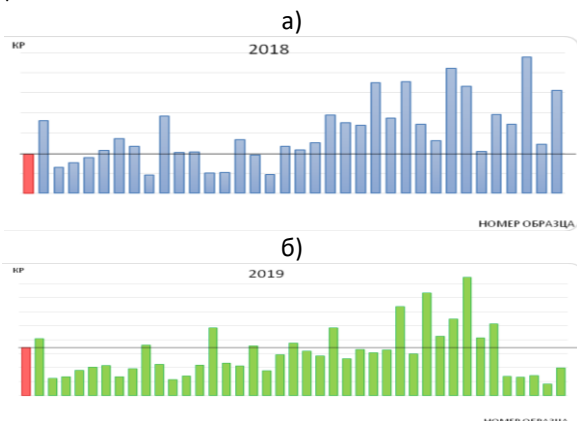


Рис. 4. Значения КЧП для коллекционных образцов: а) 2018 г.; б) 2019 г.; г) 2020 г.; д) 2021 г.

Примечание: 1 – сорт Викрав, St; 2 – сорт Павловский -12 (К- 27880), Воронежская обл.; 3 – из коллекции Богдана, Саратовская обл. (К-27955), 4 – дик. Актюбинская обл. (К-34513); 5 – местный (ВИР) Семипалатинская (К- 37505); 6 – дик. Семипалатинская (К- 37507); 7 – дик. Целиноградская (К- 38105); 8 – сорт Донецкий, Донецк (К- 38873); 9 – сорт Нусзест, США (К- 46937); 10 – сорт Батыр, Казахстан (К- 47346); 11 – дик. Канада (К- 48290); 12 – дик. Венгрия (К- 50086); 13 – сорт Ephraim, США (К- 50857); 14 – дик. Венгрия (К- 50889); 15 – сорт Петровский, Украина (К- 50974); 16 – дик. Украина (К- 51101); 17 – дик. Ставропольский кр. (К- 51104); 18 – дик. Челябинская обл. (К- 51330); 19 – дик. Украина (К- 51363); 20 – сорт Бурабай, Казахстан (К- 51662); 21 – Дамсинский степной, Казахстан (К- 51663); 22 – дик. Донецк (К- 51768); 23 – дик. Донецк (К- 51797); 24 – дик. Челябинская обл. (К- 51798); 25 – дик. Украина (К- 52357); 26 – дик. Казахстан (К- 52376); 27 – дик. Казахстан (К- 52379); 28 – дик. Казахстан (К- 52380); 29 – дик. Казахстан (К- 52382); 30 – дик. Казахстан (К- 52441); 31 – сортообразец №1/2-18 СтНИИСХ; 32 – №2/2-18 СтНИИСХ; 33 – №3/2-18 СтНИИСХ; 34 – №4/2-18 СтНИИСХ; 35 – №5/20- №18 СтНИИСХ; 36 – №6/2-18 СтНИИСХ; 37 – №1/песо СтНИИСХ; 38 – №2/песо СтНИИСХ; 39 – №3/песо СтНИИСХ; 40 – №4/песо СтНИИСХ; 41 – №6/песо СтНИИСХ.

В ходе исследований за 2018-2021 гг. было выделено по результатам четырех лет пользования травостоем 11 комплексно ценных образцов разнообразного эколого-географического происхождения. Наиболее высокоресурсными для создания сортов житняка гребневидного с продуктивным долголетием являются дикорастущие образцы из Казахстана К- 52382 и К-52441 (на рисунках дел. 29 и 30), а также селекционные образцы №№ 1/2-18 (дел. 31), 3/2-18 (дел. 33), 4/2-18 (дел. 34), 6/2-18 (дел. 36). Для создания сортов интенсивного типа в качестве ценного исходного материала для селекции выделены сорта Павловский-12 К- 27880 (дел.2), Батыр К- 47346 (дел.10) и Дамсинский степной из Республики Казахстан К- 51663 (дел. 21), Петровский из Украины К- 50974 (дел.15) и дикорастущий образец из Челябинской области К- 51798 (дел.24).

Обсуждения

В нашей работе стояла задача оценки и изучения коллекционных образцов житняка гребневидного не только по отдельным признакам, но и, что более важно по комплексу хозяйственно ценных признаков и свойств. Получить достоверную математическую обработку данных в однократной повторности не всегда возможно. Использование метода единого комплексного числового показателя (КЧП), учитывающего одновременно все 12 изученных признаков, позволило ранжировать коллекционные образцы по годам пользования травостоем. Мы впервые использовали выше описанный метод при расчете данных, полученных на изучаемых образцах растений житняка гребневидного, опираясь на полученные результаты ученых, работающих с крупным и мелким рогатым скотом. В своих исследованиях Катков К.А. Криворучко А.Ю., Каниболоцкая А.А. [13] подробно описали ранжирование различных показателей овец. Ученые Крамаренко А., Кузьмичева Н., Крамаренко С. [15] в своих работах показали анализ главных компонент ростовых признаков южной *мясной породы скота*. Метод комплексного числового показателя ранее [19] описан в методических пособиях, использовался в других работах и был применен при анализе данных крупного рогатого скота. Ученый Катков К.А. в соавторстве создал ряд учебных пособий по математической обработке данных, а так же смог успешно применять расчеты по этому методу не только для животных [20, 21], но и для растений, что немаловажно для питомников, заложенных в однократной повторности. В наших исследованиях метод КЧП впервые применен на растениях.

Заключение

Результаты всесторонней оценки коллекционного фонда житняка гребневидного различного эколого-географического происхождения в условиях Центрального Предкавказья показали большое разнообразие образцов по хозяйственно ценным признакам в зависимости от происхождения, климатических условий и года пользования травостоем.

Представленный алгоритм формирования комплексного показателя ценности коллекционных образцов, изучаемых в однократной повторности, позволяет провести оценку исходного коллекционного материала для использования в дальнейшей работе. При этом такая оценка позволяет выявить наиболее значимые показатели для формирования продуктивности кормовой массы и семян житняка гребневидного и установить взаимозависимость изученных параметров.

Проведенные с помощью комплексного числового показателя оценка и ранжирование изученных коллекционных образцов житняка гребневидного позволили выявить по комплексу хозяйственно ценных признаков высокоресурсные дикорастущие образцы из Казахстана (К-52379 и К-52382), из Челябинской области (К- 51798), сорта Павловский-12 (К-27880), Батыр (К- 47346), Дамсинский степной (К-51663) и Петровский (К- 50974), а также селекционные образцы №№ 1/2-18, 3/2-18, 4/2-18, 6/2-18 для использования в селекционной практике.

Литература

1. Чумакова В. В., Чумаков В. Ф., Деревянникова М. В. Сорта кормовых трав как фактор и ресурс инновационного развития регионального кормопроизводства // *Сельскохозяйственный журнал*. 2022. № 4 (15). С. 3-7. DOI:10.25930/2687-1254/004.4.15.2022.
2. Кравцов В. В., Деревянникова М. В., Чумакова В. В. Житняк перспективная культура для возделывания южных регионов России // *Новости науки в АПК*. 2018. № 2-2 (11). С. 189-191.
3. Кравцов В. В., Кравцов В. А. Сорта многолетних трав – биомелиоранты деградированных засоленных земель // *Интродукция нетрадиционных и редких сельскохозяйственных растений*. 3-я Международная научно-производственная конференция (14-19 июня 2000 г. г. Пенза). Пенза, 2000. 175 с.
4. К вопросу биологизации и восстановления биоразнообразия аридных агроландшафтов Северо-Кавказского региона / В. В. Кравцов, В. В. Чумакова, В. А. Кравцов и др. // *Лесомелиорация и адаптивное освоение аридных территорий*. Материал Всероссийской научно-практической конференции «Вековой опыт и перспективы агролесомелиорации аридных ландшафтов на юге Российской Федерации (к 50-летию Ачикулакской НИЛОС)». Волгоград, 2000. С. 120-121.
5. Кравцов В. А., Дударь Ю. А. Новые адаптивные сорта многолетних трав // *Земледелие*. 2000. № 3. С. 44.
6. Филоненко В. А., Дыба Н. С., Селиверстова Е. Н., Сравнительное изучение дикорастущих форм житняков // *Выращивание и откорм овец и коз: Сборник научных трудов*. Ставрополь. 1991. С. 71-74.
7. Кравцов В. В., Чумакова В. В., Кравцов В. А., Результаты и перспективы селекционной работы с многолетними кормовыми травами для засоленных и малопродуктивных земель сухостепной зоны //

Защитное лесоразведение и мелиорация земель. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Защитное лесоразведение и мелиорация земель в степных и лесостепных районах России (Итоги и опыт за 50 лет, задачи на ближайшую перспективу)» (9-12 сентября 1998 г., Волгоград). Москва, 1999. С. 259-262.

8. Кравцов В. В., Кравцов В. А., Гаджиев М. Д. Сорта многолетних трав – биомелиоранты засоленных и малопродуктивных земель // Флористические и геоботанические исследования в Европейской России. «Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.Д. Фурсаева (21-24 августа 2000 года, г. Саратов). Саратов, 2000. С. 328-330.

9. Современные сорта многолетних трав как основа ландшафтно-экологического земледелия и кормопроизводства / В. В. Кравцов, В. В. Чумакова, М. В. Деревянникова и др. // Эффективный АПК: Производство и переработка продукции растениеводства. Всероссийский научно-публицистический журнал для профессионалов, 2021. № 2 (4). С. 62-63.

10. Деревянникова М. В., Чумакова В. В., Чумаков В. Ф. Перспективный исходный материал для селекции житняка гребневидного в условиях Ставропольского края // Кормопроизводство. 2020. № 5. С. 39-41. doi: 10.25685/KRM

11. Продуктивный потенциал коллекционных образцов житняка гребневидного в условиях Ставропольского края / М. В. Деревянникова, В. В. Чумакова, В. Ф. Чумаков и др. // Зерновое хозяйство России. 2021. № 3 (75). С. 3-7. doi: 10.31367/2079-8725-2021-75-3-3-7

12. Деревянникова М. В., Чумакова В. В. Изменчивость продуктивности коллекционных образцов житняка гребневидного в условиях Ставропольского края // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки. Материалы IV международной научно-практической конференции. Научный редактор В. С. Паштецкий. Симферополь: Ариал, 2019. С.152-154.

13. Катков К. А. Криворучко А. Ю., Каниболоцкая А. А. Использование комплексного показателя для оценки параметров продуктивности у овец породы российский мясной меринос // Вестник аграрной науки. 2021. №4(91) С. 62-71. doi: 10.17238/issn2587-666X.2021.4.62.

14. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков и др. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

15. Крамаренко А., Кузьмичева Н., Крамаренко С. Анализ главных компонент ростовых признаков южной мясной породы скота // Stiinta agricola. 2018. № 1. С. 126-131.

16. Криворучко А.Ю., Каниболоцкая А.А., Катков К.А. Оценка фенотипических показателей овец Северокавказской мясо-шерстной породы методом анализа главных компонент // Вестник Ульяновской

государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1 (57). С. 174-181. doi:10.18286/1816-4501-2022-1-174-181.

17. Криулина Е. Н., Катков К. А., Кашаев И. В. Анализ устойчивости производства продукции сельского хозяйства в СКФО на основе комплексного числового показателя // АПК: экономика, управление. 2022. № 7. С. 65-74. doi: 10.33305/227-65

18. Нелинейный метод главных компонент. URL : <http://pca.narod.ru/> (дата обращения: 30.04.2021)

19. Адлер Ю.П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

20. Катков К.А. Формирование комбинированного селекционного индекса в овцеводстве // Вестник аграрной науки. 2019. № 5(80). С. 75-83.

21. Катков К. А. Обзор методов оценки и ранжирования животных по нескольким признакам с помощью комплексного показателя // Сельскохозяйственный журнал. 2020. № 3 (13). С. 51-58.

References

1. Chumakova V. V., Chumakov V. F., Derevyannikova M. V. Feed grass varieties as a factor and resource for innovative development of regional Feed production // Agricultural Journal. 2022. No. 4 (15). P. 3-7. DOI: 10.25930/2687-1254/004.4.15.2022.

2. Kravtsov V. V., Derevyannikova M. V., Chumakova V. V. Wheatgrass: a promising crop for cultivation in the southern regions of Russia // Science News in the Agro-Industrial Complex. 2018. No. 2-2 (11). P. 189-191.

3. Kravtsov V. V., Kravtsov V. A. Perennial grass varieties – biомелиоранты of degraded saline lands // Introduction of non-traditional and rare agricultural plants. 3rd International Scientific and Production Conference (June 14-19, 2000, Penza). Penza, 2000. 175 p.

4. On the issue of biologization and restoration of biodiversity of arid agrolandscapes of the North Caucasus region / V. V. Kravtsov, V. V. Chumakova, V. A. Kravtsov, et al. // Forest reclamation and adaptive development of arid territories. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Century-old experience and prospects of agroforestry reclamation of arid landscapes in the south of the Russian Federation (on the 50th anniversary of the Achikulak NILOS)". Volgograd, 2000. P. 120-121.

5. Kravtsov V. A., Dudar Yu. A. New adaptive varieties of perennial grasses // Agriculture. 2000. No. 3. P. 44.

6. Filonenko V. A., Dyba N. S., Seliverstova E. N., Comparative study of wild forms of wheatgrass // Growing and fattening of sheep and goats: Collection of scientific papers. Stavropol. 1991. P. 71-74.

7. Kravtsov V. V., Chumakova V. V., Kravtsov V. A., Results and prospects of breeding work with perennial forage grasses for saline and low-productivity lands of the dry-steppe zone // Protective afforestation and land reclamation. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Protective Afforestation and Land Reclamation in the Steppe and Forest-Steppe

Regions of Russia (Results and Experience over 50 Years, Tasks for the Near Future)" (September 9-12, 1998, Volgograd). Moscow, 1999. P. 259-262.

8. Kravtsov V. V., Kravtsov V. A., Gadzhiev M. D. Perennial grass varieties – bioameliorants of saline and low-productivity lands // Floristic and Geobotanical Research in European Russia. "Proceedings of the All-Russian scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor A. D. Fursaev (August 21-24, 2000, Saratov). Saratov, 2000. P. 328-330.

9. Modern varieties of perennial grasses as the basis for landscape-ecological farming and Feed production / V. V. Kravtsov, V. V. Chumakova, M. V. Derevyannikova, et al. // Effective agro-industrial complex: Production and processing of plant products. All-Russian scientific and journalistic journal for professionals, 2021. No. 2 (4). P. 62-63.

10. Derevyannikova M. V., Chumakova V. V., Chumakov V. F. Promising source material for breeding crested wheatgrass in the conditions of the Stavropol Territory // Feed production. 2020. No. 5. P. 39-41. doi: 10.25685/KRM

11. Productive potential of collection samples of crested wheatgrass in the conditions of Stavropol Krai / M. V. Derevyannikova, V. V. Chumakova, V. F. Chumakov, et al. // Grain Economy of Russia. 2021. No. 3 (75). P. 3-7. doi: 10.31367/2079-8725-2021-75-3-3-7

12. Derevyannikova M. V., Chumakova V. V. Variability in the productivity of collection samples of crested wheatgrass in the conditions of Stavropol Krai // Current state, problems and prospects for the development of agricultural science. Proceedings of the IV international scientific and practical conference. Scientific editor V. S. Pashtetsky. Simferopol: Arial, 2019. P. 152-154.

13. Katkov K. A., Krivoruchko A. Yu., Kanibolotskaya A. A. Using a complex indicator to assess productivity parameters of Russian Meat Merino sheep // Vestnik of Agrarian Science. 2021. No. 4 (91) P. 62-71. doi: 10.17238/issn2587-666X.2021.4.62.

14. Applied statistics. Classification and dimensionality reduction / S. A. Ayvazyan, V. M. Buchstaber, I. S. Enyukov, et al. Moscow: Finance and Statistics, 1989. 607 p.

15. Kramarenko A., Kuzmicheva N., Kramarenko S. Principal component analysis of growth traits in southern beef cattle // Stiinta agricola. 2018. No. 1. P. 126-131.

16. Krivoruchko A. Yu., Kanibolotskaya A. A., Katkov K. A. Evaluation of phenotypic parameters of North Caucasian meat and wool sheep breed using principal component analysis // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2022. No. 1 (57). P. 174-181. doi:10.18286/1816-4501-2022-1-174-181.

17. Kriulina E. N., Katkov K. A., Kashchaev I. V. Analysis of the sustainability of agricultural production in the North Caucasus Federal District based on a complex numerical parameter // AIC: economics, management. 2022. No. 7. P. 65-74. doi: 10.33305/227-65

18. Nonlinear principal component analysis. URL: <http://pca.narod.ru/> (access date: 30.04.2021)

19. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. Planning an experiment in search for appropriate conditions. Moscow: Nauka, 1976. 279 p.

20. Katkov K. A. Formation of a combined selection index in sheep breeding // Vestnik of Agrarian Science. 2019. No. 5 (80). P. 75-83.

21. Katkov K. A. Review of methods for assessing and ranking animals by several traits using a complex indicator // Agricultural Journal. 2020. No. 3 (13). P. 51-58.

Источники устойчивости к септориозу льна в условиях Северо-Западного региона**Л. П. Кудрявцева**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»

172002, Тверь, Комсомольский проспект, 17/56

✉ info.fncl.ru

Резюме. Септориоз (пасмо) – одна из широко распространенных болезней в льноводной зоне России и других странах. Поиск устойчивых генотипов льна к вредоносной болезни – септориозу с использованием биообразцов «Коллекции микроорганизмов – возбудителей болезней льна» для создания новых сортов было целью наших исследований. В Северо-Западном регионе Тверской области в 2021-2024 гг. в полевых условиях с использованием искусственно-провокационного фона на септориоз проводили фитопатологическое тестирование образцов льна с целью поиска устойчивых генотипов к данному патогену. В работе использовали коллекционные образцы, селекционный материал льна и биообразцы спорового материала (льносолома, пораженная патогеном) возбудителя септориоза из «Коллекции микроорганизмов – возбудителей болезней льна». За годы исследований среди изученных 860 генотипов, 52 образца характеризовались среднеустойчивой реакцией. Устойчивость на уровне свыше 60,0 % к септориозу показали 9 коллекционных образцов и селекционных линий льна-долгунца: 0-15210-6-3, К-101, Л-3023-6-36, Л-2987-8-5, П-279, Г-61-523-9, Г-119-524-9, К-6233*, К-6888* Порт 3. Оценка дополнительно на инфекционных фонах к ржавчине и фузариозному увяданию позволила выявить образцы с групповой устойчивостью к трем патогенам. Высокую устойчивость к фузариозному увяданию, ржавчине и устойчивую к септориозу проявили 5 образцов: Л-3023-6-36, Л-2987-8-5, П-279, Г-61-523-9, 0-15210-6-3. Генотипы: К-101*, Г-119-524-9, К-6233* характеризовались высокой устойчивостью к ржавчине (100 %) и устойчивостью к септориозу. Использование 9 источников, характеризующихся устойчивостью на уровне 65,0...75,0 % к септориозу, в селекционной программе позволит повысить эффективность селекционной работы по созданию устойчивых к болезням сортов льна.

Ключевые слова: лен-долгунец, селекция, образец, устойчивость к болезням, возбудитель, инфекционно-провокационный питомник.

Для цитирования: Кудрявцева Л. П. Источники устойчивости льна к септориозу в условиях Северо-Западного региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 35-40. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-35-40

Sources of resistance to flax septoria in the North-Western region**L. P. Kudryavtseva**

FSBEI HE Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Bast Crops"

172002, Tver, Komsomolsky Ave., 17/56

✉ info.fncl.ru

Abstract. Septoria (pasmus) is one of the widespread diseases in the flax-water zone of Russia and other countries. The goal of our research was to find flax genotypes resistant to the harmful disease septoria using biological samples from the Collection of Microorganisms that cause Flax Diseases to create new varieties. In the Northwestern region of the Tver Region in 2021-2024, phytopathological testing of flax samples was carried out in the field using an artificially provocative background for septoria on the basis of the laboratory of breeding technologies of the Federal State Budgetary Institution Federal Research Center for Bast Crops in order to find resistant genotypes to this pathogen. The work used collection samples, flax breeding material and biological samples of spore material (flax straw affected by the pathogen) of the causative agent of septoria from the "Collection of microorganisms that cause flax diseases". Over the years of research (2021-2024), among the 860 genotypes studied, 52 samples were characterized by an average stable reaction. Resistance at a level of over 60,0% to septoria was shown by 9 samples and breeding lines of flax: 0-15210-6-3, K-101, L-3023-6-36, L-2987-8-5, P-279, G-61-523-9, G-119-524-9, K-6233*, K-6888* Port 3. Evaluation additionally on infectious backgrounds to rust and fusarium wilt revealed samples with group resistance to three pathogens. 5 samples showed high resistance to fusarium wilt, rust and resistant to septoria: L-3023-6-36, L-2987-8-5, N-279, G-61-523-9, 0-15210-6-3. Genotypes: K-101*, G-119-524-9, K-6233* were characterized by high rust resistance (100%) and resistance to septoria. The use of 9 sources characterized by resistance at the level of 65.0-75.0% to septoria in the breeding program will increase the efficiency of breeding work to create disease-resistant flax varieties.

Keywords: long-lived flax, pathogen, breeding, variety, disease resistance, pathogen, infectious and provocative nursery.

For citation: Kudryavtseva L. P. Sources of flax resistance to septoria in the conditions of the North-Western region // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 35-40 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-35-40

Введение

Важнейшей технической культурой России и основным источником натурального сырья для многих отраслей народного хозяйства является лен культурный [1, 2, 3]. Одним из самых универсальных биологических воздействий, которым подвергаются льняные растения, являются патогенные микроорганизмы. Требованиями к условиям окружающей среды каждого вида возбудителей болезней льна, и в частности, возбудителя септориоза (пасмо), объясняется их географическое распространение в льноводной зоне, являющееся более или менее постоянным в связи с определенными почвенно-климатическими условиями той или иной области, республики, страны [4, 5]. Своеобразие метеорологических условий в каждом регионе неизбежно вызывает колебания в темпах размножения и развития микроорганизмов, в их количественном составе и запасах зимующих стадий [6, 7].

Возбудитель септориоза (пасмо) льна – несовершенный гриб *Septoria linicola* (Speg.) Gar. Гриб в основном развивается в конидиальной стадии. Сохраняется мицелием в оболочке семени или зародыше. Зимуют пикниды с пикноспорами на растительных остатках льна: стеблях, коробочках [8].

Септориоз поражает растения во все фазы роста и развития. Первые признаки заболевания проявляются в виде пятен на семядольных листочках. Развитие болезни достигает максимума в период созревания льна, этому способствует сочетание повышенной температуры воздуха ($20...24^{\circ}\text{C}$), частого выпадения осадков, повышенная влажность ($70...85\%$), а также накопление инфекции за предыдущий период. Стебель приобретает пестрый вид от чередования пораженных и здоровых участков. Пятна на стебле охватывающие, коричневые. В дальнейшем болезнь переходит на бутоны, коробочки и семена. Септориоз проявляется ежегодно с различной степенью вредности [9, 10]. По данным Института льна в течение последних 10 лет только 1 год характеризовался депрессивным развитием болезни, 3 – высоким, а 6 – умеренным [11]. В зависимости от интенсивности инфекции вредоносность септориоза будет различной. Для сформировавшихся растений пасмо не вызывает существенных потерь урожая и глубоких физико-химических изменений, которые отразились бы на свойствах волокна и качестве масла [11]. Однако, исследования показывают, что при благоприятных оптимальных экологических факторах пасмо может существенно снижать урожай и качество льнопродукции [12]. Сильное поражение льна септориозом во время цветения снижает содержание масла в семенах и йодное число масла, качество длинного волокна снижается от 1 до 4 номеров, выход всего волокна до 4 %, а урожай семян – на $6...13\%$ [13, 14].

Высокоустойчивые сорта льна-долгунца к болезни в производстве отсутствуют. Сорта Цезарь (Институт льна, Россия) и Грант (Республика Беларусь) характеризуются средней устойчивостью [11].

Селекция на устойчивость к септориозу сдерживается в основном из-за отсутствия высокоустойчивых к патогену генотипов льна. Значимость генофонда льна, сосредоточенному в мировых коллекциях ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (ФНЦ ЛК) и ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. В. Вавилова» (ВИР) трудно переоценить [15, 16, 17, 18]. Информация о реакции образцов на устойчивость к болезням является важнейшим рычагом повышения урожаев сельскохозяйственных культур, и в частности льна.

Цель исследований – поиск источников устойчивости льна среди коллекционных образцов и селекционного материала к септориозу в условиях Северо-Западного региона.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2021-2024 гг. в Тверской области. Объектом исследований служили коллекционные образцы ВИРА и ФГБНУ ФНЦ ЛК, селекционный материал Института льна.

Наиболее эффективным способом создания инфекционного фона, позволяющим получить достоверную оценку, является метод внесения пораженной льносолумы в почву и дополнительная раскладка пораженной пасмо льносолумы по всходам восприимчивых сортообразцов [19]. Селекционная программа по оценке льна на устойчивость к пасмо в Институте льна предусматривает ежегодное создание искусственной полевой популяции с использованием коллекционных биообразцов *Septoria linicola* [11]. Отбирали биообразцы (льносолому, пораженную пасмо) осенью из очагов заражения, стараясь включить в популяцию как можно больше биотипного разнообразия. Хранили обмолоченную льносолому в неотапливаемом складском помещении. Весной проверяли методом влажной камеры на наличие и жизнеспособность инфекции. Минимальная, оптимальная и максимальная проростаемость спор – 40, 75, и 100 %. Качественным инокулюм считается, если проросло $75...87\%$ спор. Перед внесением в почву ее измельчали на отрезки длиной $1...1,5\text{ см}$ и вносили в рядки на глубину $6...7\text{ см}$ из расчета $5...6\text{ г.}$ на рядок 1 м . Сверху присыпали слоем здоровой почвы $1...2,5\text{ см}$, при недостатке влаги в почве проводили полив, а затем высевали семена. Дополнительно по периметру восприимчивого сорта Славный 82, образцов П-73, М-215 ($4...5$ рядков) на $3...5$ сутки после появления полных всходов раскладывали равномерно инфекционный материал из расчета $250...350\text{ г}$ на 10 погонных метров яруса. При оценке на устойчивость к септориозу сортообразцы льна разбивали на группы по скороспелости, и учет развития болезни по каждой группе проводили в одно время. Все годы исследований были благоприятными для развития инфекции, а значит и для оценки льна на устойчивость к болезни. Индикаторные сортообразцы льна поражались до $85,0\%$. При обработке цифрового материала использовали стандартные методы

статистического анализа (Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.)*).

Результаты

Самыми крупными коллекциями льна в России и в мире, что признано экспертами ФАО, являются «Национальная коллекция русского льна» ВНИИЛ и коллекция ВНИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова [17]. На основании комплексного изучения в инфекционно-провокационных питомниках коллекционных образцов ВИРа, ВНИИ льна на протяжении многих десятилетий создана база данных по устойчивости к фузариозному увяданию, ржавчине, антракнозу, и в том числе, к септориозу. Собраны и систематизированы данные 1155 образцов коллекции льна по устойчивости к септориозу. Анализ собранной информации позволил установить, что из 1155 изученных образцов льна высокой устойчивостью к септориозу (развитие болезни ниже 30,0 %) характеризовались только 20 генотипов. Информация по устойчивости образцов к болезням представлена в специально разработанной базе данных, а материал, собранный до 2000 года, кроме того, опубликован в книге [21]. Иммунологический анализ коллекции льна позволил выявить генотипы (с уровнем устойчивости 60,1...75 % и выше), представляющие интерес для использования в качестве исходного материала (табл. 1).

Таблица 1. Структура коллекционных образцов льна по устойчивости к септориозу (полевой инфекционно-провокационный питомник, 1986-2024 гг.)

Год исследований	Количество образцов	
	всего изучено	из них устойчивых свыше 60,0 %
1986-1989	300	2
1990-1992	295	6
1993-1995	324	9
1996-2000	236	3
2001-2005	324	4
2006-2010	268	5
2011-2015	517	6
2016-2020	722	6
2021-2024	860	9

Исследования по поиску устойчивых генотипов было продолжено и в последующие годы. Фитопатологическое тестирование 1831 образца коллекции и селекционного материала льна в 2001-2020 гг. показало, что основная масса испытуемых генотипов поражалась септориозом. Развитие болезни составляло от 25,0 до 85,0 %. Высокоустойчивых образцов не обнаружено. Выделен 21 генотип льна, характеризующийся повышенной устойчивостью к болезни. Применение инфекционно-провокационных условий заражения возбудителем позволило изучить реакцию к болезни в 2021-2024 гг. в Северо-Западной регионе еще 860 селекционных линий и образцов коллекции льна. Для получения объективной оценки селекционного и коллекционного материала льна на устойчивость к болезни необходимо в первую очередь наличие качественного и в

достаточном количестве спорowego инфекционного материала; восприимчивых к септориозу сортов-инфекторов, а также благоприятных для развития патогена метеорологических условий. Для этих целей проводили сбор инфицированных растений (льносолома, пораженная септориозом) в предуборочный период в производственных посевах сортов, включенных в Госреестр селекционных достижений, а также в семеноводческих, коллекционном питомнике Института льна, отбирая пораженные растения с четко выраженными симптомами болезни. Проверка на жизнеспособность инфекции показала пригодность инокулюма для его использования, по годам жизнеспособность патогена составляла 85,0...90,0 %. Как неоднократно упоминалось для развития инфекционного процесса необходимо наличие определенной температуры и влажности воздуха. В зависимости от погодных условий распространение пасмо на сортах льна-долгунца в течение исследуемых вегетационных сезонов отличалось по своему уровню, темпам нарастания инфекции. Однако все годы исследований были благоприятными для развития инфекции. Температура воздуха в конце июля- начале августа в 2021 и 2022 гг. составила 20...23 °С, периодически наблюдали пасмурную погоду с осадками, относительная влажность воздуха составила 68...79 %. Эпифитотийное развитие пасмо льна было отмечено в течении двух лет (2023-2024 гг.), этому способствовали высокая температура воздуха (22...25 °С) и относительная влажность воздуха (79...82 %), а также осадки и обильные росы в конце июля, в первой и второй декадах августа. Начиная с массового цветения растений, во второй декаде июля, на 95 % селекционного и коллекционного материала наблюдали развитие пасмо на настоящих листочках. Позднее пасмо стремительно развивалось. Наличие первичной инфекции, благоприятных погодных условий во 2 и 3 декадах августа (тепло и влага) способствовали сильному развитию патогена в инфекционном питомнике. Оценка образцов коллекции и селекционного материала в инфекционно-провокационном питомнике на септориоз в течение 2021-2024 гг. позволила выявить различную степень устойчивости к патогену у оцениваемого материала. Как упоминалось выше, болезнь проявлялась ежегодно, при этом восприимчивый сорт-стандарт – Славный 82 поражался на 71,7...82,0 %, а у относительно устойчивого сорта-стандарта Белинка пораженность составила от 19,8 до 34,5 %. Реакция к патогену изучаемых генотипов была разнообразной и составляла от 25,0 до 85,0 %.

Развитие инфекции, учет и анализ исходного материала на устойчивость к септориозу льна говорит об очень бедном содержании в генофонде надежных источников устойчивости к этому заболеванию. Из общего объема исследуемого материала за 2021-2024 гг. к септориозу, среднеустойчивые и устойчивые составили 61 генотип (устойчивость 50,0...75,0 %) и 799 образцов и селекционного материала оказались восприимчивыми с пораженностью 65,0...85,0 %. Структура устойчивости льна к септориозу представлена в таблице 2. Уровень устойчивости образцов, превышающий 60 % барьер, в

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки)

среднем по годам составил 1,1 %. В 2023 и 2024 гг. не выявлено ни одного коллекционного образца с устойчивостью свыше 60,0 % (табл.2). За годы исследований среди 549 селекционных линий льна-долгунца средне устойчивые и устойчивые составили 8,1 %, а среди 311 коллекционных образцах – 5,1 %.

Таблица 2. Результаты оценки коллекционного и селекционного материала льна на устойчивость к септориозу

Год		Всего образцов	Количество генотипов, шт.	
			среднеустойчивые	устойчивые
2021	Селекционный материал	129	3	2
	Образцы коллекции	92	2	1
2022	Селекционный материал	153	29	1
	Образцы коллекции	90	4	2
2023	Селекционный материал	131	5	1
	Образцы коллекции	33	0	0
2024	Селекционный материал	136	2	2
	Образцы коллекции	96	7	0
Всего:		860	52	9

Таблица 3. Устойчивость генотипов льна к болезням

Генотип	Устойчивость, %		
	септориоз	ржавчина	фузариозное увядание
0-15210-6-3	66,6	96,7	89,5
К-101	65,0	93,0	75,9
Л-3023-6-36	66,8	100	93,7
Л-2987-8-5	68,4	91,2	82,6
П-279	75,0	91,7	87,5
Г-61-523-9	75,0	100	90,0
Г-119-524-9	75,0	100	55,1
К-6233*	75,0	100	69,0
К-6888* Порт 3	75,0	78,0	66,7
Славный 82, восприимчивый стандарт	27,3	-	-
НСР ₀₅	28,3	15,3	17,8

Фитопатологический анализ коллекции и селекционного материала льна позволил выявить 9 генотипов с уровнем устойчивости 65,0...75,0 %, представляющие интерес для использования в качестве исходного материала для селекции на устойчивость к септориозу: 0-15210-6-3, К-101, Л-3023-6-36, Л-2987-8-5, П-279, Г-61-523-9, Г-119-524-9, К-6233*, К-6888* Порт 3, что демонстрирует таблица 3. Генотипов, характеризующих высокую устойчивость (свыше 75,0 %) из коллекции ОП НИИЛ ФНЦ ЛК на современном этапе, не обнаружено (табл. 2, 3). Кроме того,

была проведена на инфекционных фонах оценка данных генотипов на устойчивость к фузариозному увяданию и ржавчине. Групповую устойчивость к трем патогенам: фузариозному увяданию, ржавчине и септориозу проявили 5 образцов: Л-3023-6-36, Л-2987-8-5, П-279, Г-61-523-9, 0-15210-6-3. Генотипы: К-101*, Г-119-524-9, К-6233* характеризовались высокой устойчивостью к ржавчине (100 %) и устойчивостью к септориозу (табл. 3).

Обсуждение

Устойчивость к болезням сортов – экономически и экологически перспективный путь перехода к адаптивному растениеводству [1, 2, 3].

Благодаря целенаправленной селекционной работе на устойчивость к двум наиболее вредоносным болезням решена проблема борьбы с ржавчиной, значительно снизился вред от фузариозного увядания. В настоящее время в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, включены сорта селекции ФНЦ ЛК с высокой групповой устойчивостью к данным патогенам. Однако все сорта льна-долгунца, находящиеся в производстве, в том числе сорта селекции Института льна с групповой высокой устойчивостью к фузариозному увяданию и ржавчине, по данным инфекционно-провокационным питомников восприимчивы к септориозу [20]. Высокий уровень групповой устойчивости сортов и селекционного материала к фузариозному увяданию и ржавчине позволяет обратить особое внимание на широко распространенное заболевание – септориоз. Направленная селекционная работа на устойчивость к септориозу сдерживается из-за отсутствия высокоустойчивого исходного материала. Кроме того, выявление образцов с групповой устойчивостью к нескольким болезням решает сразу несколько задач, позволяет сорту обеспечить полное проявление их биологических возможностей, реализацию хозяйственно ценных признаков и получение высокого стабильного урожая. Выявлены 9 источников с устойчивостью на уровне 60,1...75,0 %, к септориозу, и в том числе, некоторых из них, с групповой устойчивостью к фузариозному увяданию и ржавчине. Использование их в селекционных программах позволит повысить эффективность селекционной работы по созданию устойчивых к болезням сортов льна.

Заключение

Скрининг исходного материала льна-долгунца на устойчивость к септориозу на инфекционном фоне в течение 24 лет (2001-2024 гг.) показал, что основная масса испытуемых генотипов была восприимчива к патогену с пораженностью 68,0...75,0 %. Исследования коллекционного и селекционного материала в полевых условиях на инфекционном фоне в 2021-2024 гг. выявили 52 образца, характеризующиеся среднеустойчивой реакцией к возбудителю и 9 устойчивых генотипов. Оценка данных образцов льна-долгунца на устойчивость к фузариозному увяданию и ржавчине выявила высокоустойчивую реакцию 5

генотипов к данным патогенам: Л-3023-6-36, Л-2987-8-5, П-279, Г-61-523-9, О-15210-6-3. Генотипы: К-101*, Г-119-524-9, К-6233* характеризовались не только устойчивостью к септориозу, но и высокой устойчивостью к ржавчине (100 %), которые можно использовать в селекционной работе на данный признак.

Литература

1. Понажев В. П., Пролетова Н. В. Состояние и перспективы развития селекции и семеноводства льна-долгунца в Российской Федерации // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2023. №4. (10). С. 30-38.
2. Оценка коллекционных образцов льна-долгунца по урожайности льноволокна и параметрам адаптивности в условиях Северо-Запада Российской Федерации / А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23. № 1. С. 54-68.
3. Жученко А. А., Рожмина Т. А. Генетические ресурсы и селекция растений – главные механизмы адаптации в сельском хозяйстве // Вестник аграрной науки. 2019. № 6 (81). С. 3-8.
4. Кудряшова Т. А., Виноградова Т. А., Козьякова Н. Н. Конкурентоспособность отечественных сортов льна-долгунца по выходу и качеству длинного волокна при переработке льнотресты в современных условиях производства // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2020. №3(56). С. 55-65. doi: 10.31677/2072-6724-2020-563-55-65
5. Кинчарова М. Н., Кинчаров А. И., Абдюев М. Р. Источники заражения зерна озимой пшеницы грибной инфекцией в лесостепи Самарской области // Аграрная наука. 2024. №380 (3). С.119-123. doi:10.32634/0869-8155-2025-390-01-106-113
6. Пролетова Н. В., Зотова В. С. Разнообразие форм льна, полученных при селекции in vitro на устойчивость к антракнозу (*Colletotrichum lini*) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №4 (68). С. 41-49. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-41-49
7. Кудрявцев Н. А., Зайцева Л. А., Курбанова З. К. Ресурсы улучшения фитосанитарного состояния посевов льна // Защита и карантин растений. 2020. №8. С. 22-26.
8. Нехведович С. И. Биологические особенности возбудителя септориоза на льне и вредоносность болезни в условиях Беларуси. // Сборник материалов Международной конференции молодых ученых: «Молодежь в науке». 30 октября - 02 ноября. 2017: в 2 частях. Том часть 1. Национальная академия наук Беларуси. Совет молодых ученых. 2018. Минск. Издательство: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука" С.185-192.
9. Лебединец В. Н., Волкова Г. В. Видовой состав болезней льна на территории Российской Федерации и стран Ближнего Зарубежья. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2023. №105. С.78-88. doi: 10.21515/1999-1703-105-78-88
10. Королев К. П., Боме Н.А. Фитопатологический тестинг *Linum usitatissimum* L. в условиях Северного Зауралья // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. №8 (122). С. 1785-1809. doi: 10.23670/IRJ.2022.122.8
11. Кудрявцева Л. П., Рожмина Т.А. Генотипы льна с горизонтальной устойчивостью к пасмо (септориозу) для целей селекции. // Аграрная наука. 2023. №370 (5). С.78-82. doi: 10.32634/0869-8155-2023-370-5-78-82
12. Нехведович С. И., Войтка Д. В. Фитопатологическая ситуация в посевах льна масличного в условиях Республики Беларусь и оценка вредоносности доминирующих болезней // Земледелие и селекция в Беларуси. 2020. С.66-74.
13. Нехведович С. И. Патогенный комплекс грибов, паразитирующих на льне масличном // Сборник материалов Международной конференции молодых ученых «Аграрные, гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки». 29 октября-01 ноября, 2018. Минск. Изд.: Республиканское унитарное предприятие Издательский дом «Белорусская наука». 2019. С.159-175.
14. Курчакова Л. Н., Кудряшова Т. А. Влияние пасмо на качество льноволокна // Защита и карантин растений. 2007. №9. С.19-21.
15. Куземкин И. А., Рожмина Т. А. Скрининг образцов коллекции льна-долгунца по урожайности и их адаптивность к условиям Северо-Западного региона России // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. №23 (5). С.666-674. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.666-674.
16. Трабунова Е. А., Рожмина Т. А., Андреева И. А. Скрининг образцов генофонда льна по урожайности волокна и их адаптивности к условиям Центрального Нечерноземья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. №21 (6). С.688-696.
17. Мировой генофонд льна-долгунца ВИР и селекция устойчивых к ржавчине сортов / С. Н. Кутузова, Е. А. Пороховинова, Н. Б. Брач и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2020. № 181 (2). С.60-61.
18. Linseed for dual (seed and fiber) utilization new linseed accessions in the VIR collection, suitable for dual utilization (seed and fiber) in the north-western region of the Russian Federation / A. V. Pavlov, E. A. Porokhovina, L. Novicova, et al. // Journal of Natural Fibers. 2021. Vol. 19. P. 7553-7565. doi:10.1080/15440478.2021.1952137
19. Кудрявцева Л. П. Устойчивость сортов – важный элемент интегрированной защиты льна-долгунца от болезней // Аграрный вестник Урала. 2021. №11 (214). С.36-44.
20. Устойчивость образцов Национальной коллекции Русского льна к основным грибным заболеваниям / Л. Н. Курчакова, Н. И. Лошакова, Т. В. Крылова и др. Торжок. 2000. 38 с.

References

1. Ponazhev V. P., Proletova N. V. Status and Prospects of Development of Fiber Flax Breeding and Seed Production in the Russian Federation // *Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*. 2023. No. 4. (10). P. 30-38.
2. Evaluation of Collection Accessions of Fiber Flax for Flax Fiber Yield and Adaptability Parameters in the Conditions of the North-West of the Russian Federation / A. D. Stepin, M. N. Rysev, T. A. Ryseva, et al. // *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2022. Vol. 23. No. 1. P. 54-68.
3. Zhuchenko A. A., Rozhmina T. A. Genetic Resources and Plant Breeding – the Main Mechanisms of Adaptation in Agriculture // *Bulletin of Agrarian Science*. 2019. No. 6 (81). P. 3-8.
4. Kudryashova T. A., Vinogradova T. A., Kozyakova N. N. Competitiveness of domestic varieties of fiber flax in terms of yield and quality of long fiber during flax straw processing under modern production conditions // *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2020. No. 3 (56). P. 55-65. doi: 10.31677/2072-6724-2020-563-55-65
5. Kincharova M. N., Kincharov A. I., Abdryaev M. R. Sources of infection of winter wheat grain with fungal infection in the forest-steppe of the Samara region // *Agrarian science*. 2024. No. 380 (3). P. 119-123. doi:10.32634/0869-8155-2025-390-01-106-113
6. Proletova N. V., Zotova V. S. Diversity of flax forms obtained by in vitro selection for resistance to anthracnose (*Colletotrichum lini*) // *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2024. No. 4 (68). P. 41-49. doi:10.18286/1816-4501-2024-4-41-49
7. Kudryavtsev N. A., Zaitseva L. A., Kurbanova Z. K. Resources for improving the phytosanitary condition of flax crops // *Plant Protection and Quarantine*. 2020. No. 8. P. 22-26.
8. Nekhvedovich S. I. Biological characteristics of the causative agent of septoria leaf spot on flax and the harmfulness of the disease in Belarus. // *Collection of materials from the International Conference of Young Scientists: "Youth in Science"*. October 30 - November 2, 2017: in 2 parts. Volume 1. National Academy of Sciences of Belarus. Council of Young Scientists. 2018. Minsk. Publisher: Republican Unitary Enterprise "Publishing House "Belarusian Science" P. 185-192.
9. Lebedinets V. N., Volkova G. V. Species composition of flax diseases in the Russian Federation and neighboring countries. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2023. No. 105. P. 78-88. doi: 10.21515/1999-1703-105-78-88
10. Korolev K. P., Bome N. A. Phytopathological testing of *Linum usitatissimum* L. in the conditions of the Northern Trans-Urals // *International Research Journal*. 2022. No. 8 (122). P. 1785-1809. doi: 10.23670/IRJ.2022.122.8
11. Kudryavtseva L. P., Rozhmina T. A. Flax genotypes with horizontal resistance to pasmo (septoria) for breeding purposes. // *Agrarian science*. 2023. No. 370 (5). P. 78-82. doi: 10.32634/0869-8155-2023-370-5-78-82
12. Nekhvedovich S. I., Voitka D. V. Phytopathological situation in oil flax crops in the Republic of Belarus and assessment of the harmfulness of dominant diseases // *Agriculture and breeding in Belarus*. 2020. P. 66-74.
13. Nekhvedovich S. I. Pathogenic complex of fungi parasitizing on oil flax // *Proceedings of the International Conference of Young Scientists "Agrarian, Humanitarian, Medical, Physical and Mathematical, Physical and Technical, and Chemical Sciences"*. October 29 - November 1, 2018. Minsk. Publisher: Republican Unitary Enterprise Publishing House "Belarusian Science". 2019. P. 159-175.
14. Kurchakova L. N., Kudryashova T. A. The Effect of Skein on Flax Fiber Quality // *Plant Protection and Quarantine*. 2007. No. 9. P. 19-21.
15. Kuzemkin I. A., Rozhmina T. A. Screening of Fiber Flax Collection Accessions for Yield and Their Adaptability to Conditions of the Northwestern Region of Russia // *Agrarian Science of the Euro-Northeast*. 2022. No. 23 (5). P. 666-674. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.666-674.
16. Traburova E. A., Rozhmina T. A., Andreeva I. A. Screening of flax gene pool accessions for fiber yield and their adaptability to the conditions of the Central Non-Black Earth Region // *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2020. No. 21 (6). P. 688-696.
17. World gene pool of fiber flax VIR and breeding of rust-resistant varieties / S. N. Kutuzova, E. A. Porokhovinova, N. B. Brach et al. // *Works on applied botany, genetics and breeding*. 2020. No. 181 (2). P. 60-61.
18. Linseed for dual (seed and fiber) utilization of new linseed accessions in the VIR collection, suitable for dual utilization (seed and fiber) in the northwestern region of the Russian Federation / A. V. Pavlov, E. A. Porokhovinova, L. Novicova, et al. // *Journal of Natural Fibers*. 2021. Vol. 19. P. 7553-7565. doi:10.1080/15440478.2021.1952137
19. Kudryavtseva L. P. Resistance of varieties is an important element of integrated protection of fiber flax from diseases // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021. No. 11 (214). P. 36-44.
20. Resistance of accessions of the National Collection of Russian Flax to major fungal diseases / L. N. Kurchakova, N. I. Loshakova, T. V. Krylova, et al. *Torzhok*. 2000. 38 p.

Применение микроклонального размножения в селекции пшеницы твёрдой *Triticum durum* Desf. для ускорения селекционного процесса и сохранения уникального генотипа растений

И. В. Налетов^{1✉}, исследователь сельскохозяйственных наук

Н. А. Дуктова¹, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

В. С. Заяц², биолог бюро биотехнологий

¹УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»

213410, Республика Беларусь, Могилевская обл., г. Горки, ул. Мичурина, 5

²ЗАО «Струнные технологии»

220089 Минск, Республика Беларусь, Железнодорожная ул., 33

✉i.naletov@unitsky.com

Резюме. В предлагаемой методике селекции твёрдой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в условиях северо-востока Беларуси сочетается индуцированный мутагенез с биотехнологическими методами сохранения и размножения уникальных генотипов. Место исследования: г. Горки, Могилевская область, Республика Беларусь. Цель исследования – разработать методику применения микроклонального размножения растений пшеницы твёрдой для ускорения селекционного процесса. В ходе исследования разработана оптимальная питательная среда (MSI 7) для каллусогенеза и метод гистологического прогнозирования образования эксплантов. Мутагенная обработка N-нитрозо-N-метилмочевиной (NEU) позволяет получить мутантные формы с ценными признаками, такими как масса 1000 семян, продуктивная кустистость и устойчивость к заболеваниям. Полевые испытания подтвердили стабильность индуцированных изменений и выявили перспективные мутанты: Розалия NEU 24 0,005% с рекордной массой 1000 семян (78,4 г) и Ириде NEU 6 0,005 % с увеличенной высотой растений (84,5 см). Установлено повышение устойчивости к пыльной головке и оphiоболезным корневым гнилям. Результаты, полученные в исследованиях мутагенеза, позволяют ускорить селекционный процесс для получения высокопродуктивных сортов твёрдой пшеницы, адаптированных к условиям Беларуси.

Ключевые слова: селекция пшеницы, пшеница твердая, микроклональное размножение, мутации.

Для цитирования: Налетов И. В., Дуктова Н. А., Заяц В. С. Применение микроклонального размножения в селекции пшеницы твёрдой *Triticum durum* Desf. для ускорения селекционного процесса и сохранения уникального генотипа растений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 41-48. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-41-48

Application of micropropagation in breeding durum wheat *Triticum durum* Desf. to accelerate the breeding process and preserve the unique genotype of plant

I. V. Naletov^{1✉}, N. A. Duktova¹, V. S. Zayats²

¹Belarusian State Agricultural Academy

213410, Republic of Belarus, Mogilev Region, Gorki, Michurin Street, 5

²Unitsky String Technologies Co., Ltd.,

220089, Republic of Belarus, Minsk, Zheleznodorozhnaya Street 33

✉i.naletov@unitsky.com

Abstract. The proposed method for breeding durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in northeastern Belarus combines induced mutagenesis with biotechnological methods for preserving and propagating unique genotypes. The study was conducted in Gorki, Mogilev Region, Republic of Belarus. The objective of the study was to develop a method for using micropropagation of durum wheat plants to accelerate the breeding process. An optimal nutrient medium (MSI 7) for callusogenesis and a method for histologically predicting explant formation were developed. Mutagenic treatment with N-nitroso-N-methylurea (NEU) allows for the production of mutant forms with valuable traits, such as increased 1000-seed weight, productive tillering, and disease resistance. Field trials confirmed the stability of the induced mutations and identified promising mutants: Rosalia NEU 24 0.005 % with a record-breaking 1,000-seed weight (78.4 g) and Iride NEU 6 0.005 % with increased plant height (84.5 cm). Increased resistance to pollen head and ophiobolan root rot was also observed. The results obtained in mutagenesis studies make it possible to accelerate the breeding process to develop high-yielding durum wheat varieties adapted to Belarusian conditions.

Keywords: wheat breeding, durum wheat, micropropagation, mutations.

For citation: Naletov I. V., Duktova N. A., Zayats V. S. Application of micropropagation in breeding durum wheat *Triticum durum* Desf. to accelerate the breeding process and preserve the unique genotype of plant // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026;1(73): 41-48 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-41-48

Введение

При ведении селекционного процесса пшеницы твёрдой (*Triticum durum* Desf.) возникает вопрос о

потере исходных генетически ценных образцов в коллекционном питомнике, гибридах разного поколения.

При оценке фенотипа растений в коллекционном питомнике часто возникает проблема о генетической однородности генотипа (чистые линии). Например, при закладке коллекционного питомника у селекционера может оказаться условно чистый сорт: он может быть выровнен по признакам высоты растений, количества зерен в главном колосе или цвету колосовых чешуй. В то же время по биохимии эндосперма или физиологии онтогенеза каждое растение будет значительно отличаться. Такие незначительные фенотипические отличия могут косвенно сказаться на фенотипе будущего сорта или гибрида первого поколения. А для установления единого фенотипа/генотипа у растений в коллекционном питомнике придется провести немало отборов или исследований по генетическим маркерам или фенотипам в поколениях, что в итоге приводит к затяжным работам при создании сорта.

Применение биотехнологических подходов ведет к упрощенному селекционному процессу. Культивирование в условиях *in vitro* растений и их последующее деление приводит к получению большого количества саженцев растений с дублетным составом генотипа каждого. Иными словами, микроклональное черенкование растений позволяет заложить целую экспериментальную деланку растений с полностью одинаковым фенотипом на протяжении всех лет исследования [1].

Так как *T. durum* относится к семейству злаковых и является однодольным растением, то встречаются ряд особенностей в образовании каллусных тканей или органогенеза. Для активного каллусогенеза у данных растений используют различные части как вегетативные, так и генеративные, и эмбриональные [2, 3]. Однако значительный интерес представляет каллус, полученный из зародышей в различных стадиях спелости колоса. Это обусловлено тем, что зародыши, как правило, имеют большое количество образовательных тканей, происходит активное деление клеток, и фитогормоны схожие по природе с зеатином оказывают ростостимулирующее действие [4] по сравнению с тканями у вегетирующих растений или уже с зрелых семян.

Процесс культивирования зародышей позволяет получить как каллус, так и регенерант (эмбриокультура) [5, 6]. Однако наиболее целесообразно особенно в селекции получать каллус из зародыша. Согласно исследованиям [7], каллусы злаковых растений лучше всего получать из незрелых зародышей в фазе молочной спелости, в таком случае возможно получение до 60 % каллусогенеза. Существуют сложности при получении регенерантов из каллуса злаковых по ряду причин, одна из которых является проблема биосинтеза белков в клетке запускающих терминаторы нужного белкового синтеза.

Гистологические исследования первичных каллусов позволяют получить представление о возможности органогенеза у каллусов, для этого были получены тонкие срезы толщиной 5...8 мкм, окрашивание клеток и тканей на выявление меристематических зон [8]. Выявление данных зон позволило спрогнозировать получение эксплантов до 81 %. При этом учитывались темные зоны каллуса, затем производились расчёты путём

соотношения пропорции, где вся площадь каллуса была 100 %, а площадь темных окрашиваний X %. Данный процент было принято называть эмбригенными единицами (ЭЕ или EU). После подсчёта процентов каллусы переносили на эксплантогенез и получали рост побегов [9].

В каллусогенезе можно использовать и зрелые зародыши, однако, в таком случае наличие специфических гормонов в тканях растений нет, и активировать синтез растений на получение каллуса достаточно сложно продоцировать.

Цель исследования – разработка методики ведения селекции пшеницы твёрдой (*Triticum durum* Desf.) в условиях северо-востока Республики Беларусь с применением биотехнологического подхода по сохранению и размножению уникальных генотипов, полученных вследствие индуцированной мутации.

Материалы и методы

Для создания нового сорта использовали индуцированный мутагенез с целью получения уникальных генотипов собственных линий *T. Durum* [10, 11]. Так как эти мутации проявляются в единичных случаях на растениях, их следует сохранять в первичном виде, а также все последующие поколения в условиях *in vitro*.

За основу питательной среды была принята Murashige и Skoog (MS) [2] с небольшим изменением макросолей NH_4NO_3 – 2,5 мг/л; $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 1,8 мг/л; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 0,5 мг/л, сахароза – 10 г/л, глюкоза – 10 г/л, агар-агар – 8 г/л (среда MSI). с добавлением гормонов через холодный фильтр: 2,4-Д, 6-бензиладенином (6БАП), нафталевой кислотой (NAA), гидролизатом казеина (Ка), индол-3-уксусной кислотой (ИУК), индол-3-масляной кислотой (ИМК), кинетин (К), гибберелловая кислота (ГК), а также без добавления стимулятора роста, pH 5,8.

Для подбора оптимально среды были отобраны 100 зерновок *T. durum* которые изначально были замочены в воде на 4 часа, затем перенесены в чашку Петри с предварительно смоченным бумажным матрасом. После появления coleoptиле пшеницы производилось удаление зародыша из зерновки с последующей стерилизацией в растворе перекиси водорода (H_2O_2).

Таблица 1. Варианты питательных сред для культивирования растений *T. durum.*, мл/л

Название среды	2,4-Д	6БАП	NAA	ИУК	ИМК	К	ГК	Ка
MSI 1	0,3			0,1	0,1			0,02
MSI 2		0,3			0,2			0,1
MSI 3			0,3	0,1				0,1
MSI 4	0,1	0,1	0,1			0,2		0,1
MSI 5	0,1		0,1	0,1		0,1		0,1
MSI 6		0,2					0,2	0,01
MSI 7		0,1	0,2		0,2			0,1
MSI 8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01

Расчет внесения фитогормонов проводили на основании ранее проведённых собственных экспериментов, где отмечалась особая чувствительность растений к гормонам и их дозировкам [13, 14, 15].

При оценке наилучших вариантов питательных сред рассматривали такие параметры, как выживаемость при вводе в условия *in vitro*, образование каллуса, активный рост. Все культуры инкубировались в культуральном боксе, поддерживаемом при температуре $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 16 ч/8 ч цикле света/темноты, уровне освещённости 45 ммоль/м, при влажности воздуха 80 %.

Проводили гистологические исследования первичных каллусов. Для этого часть каллуса извлекли, изготовили слайсы из каллуса с последующим окрашиванием толуидиновым синим, в результате которого подсчитывается формирование примордиев в каллусах путём визуального определения затемнений тканей. По количеству примордиев на площадь каллуса в исследовании используется процентное выражение в эмбрионных единицах (EU). Полученные экспланты были высажены в субстрат из вермикулита с добавлением питательной среды Элиса, для адаптации в условиях *ex vitro*.

Культивация растений в открытом грунте проводили на территории учебного хозяйства УО «БГСХА» д. Тушково. По схеме контрольные растения (исходники) и мутантные линии, полученные из данного контроля в одном ряду по 1 м².

Полученные результаты представлены в виде средних значений с расчётом стандартного отклонения.

Результаты

Одной из задач является подбор питательной среды, оптимальной для быстрого роста эксплантов в условиях *in vitro*, позволяющей в оптимальные сроки укоренить растения и возобновить рост. Для получения линии с полезным признаком у мутантных растений *T. durum* были использованы сформированные зародыши семян после обработки химическим мутагеном в различных концентрациях. В таблице 2 представлены результаты культивирования растений пшеницы на подобранных питательных средах.

Таблица 2. Выявление наиболее оптимальной среды для получения эксплантов, регенерантов и каллуса у зародышей *T. durum*.

Наименование среды	Выживаемость при вводе в условия <i>in vitro</i> , шт.	Образование каллуса, шт	Активный рост растения, шт
MSI 1	38	-	38
MSI 2	20	-	14
MSI 3	84	-	84
MSI 4	41	26	37
MSI 5	57	43	6
MSI 6	40	-	-
MSI 7	73	73	-
MSI 8	53	12	53

Из полученных данных наиболее лучшей питательной средой для получения каллуса является внесение ББАП 0,1 мл/л, NAA 0,2 мл/л и ИМК 0,2 мл/л (MSI 7). Помимо этого, добавление 2,4-Д 0,1 мл/л, NAA 0,1 мл/л, ИУК 0,1 мл/л и К 0,1 мл/л (MSI 5) также способствовало значительному каллусогенезу *T. durum*. В дальнейшем все мутантные растения после обработки N-нитрозо-N-метилмочевина (NEU) высевали в полевых условиях. Во время вегетации

каждое растение оценивали визуально. На стадии молочной спелости у значимых растений отбирали зародыши, стерилизовали и переносили на чистую питательную среду (MSI 7) для получения каллуса и последующей стимуляции образования тканей и органов, а также конечного образования эксплантов. В таблице 3 представлены результаты каллусогенеза у различных мутантов (M1) *T. durum*.

Таблица 3. Получение каллуса у различных мутантов (M1) *T. durum* 1 поколения после обработки мутагеном

Мутант	Процент образования каллуса	Органогенез в выделенном образце, EU/шт.	Выход эксплантов, шт.
Ириде NEU 12 0,01 %	78	82/8	185
Ириде NEU M 6 0,005 %	76	84/10	186
Розалия NEU 6 0,005 %	83	96/16	193
Розалия NEU M 24 0,005 %	91	91/19	197

Зародыши пшеницы прошли адаптацию и сформировали жизнеспособный каллус. После этого был применен метод прогнозирования получения эксплантов. Наибольшее количество обнаружено у мутантов Розалия NEU 6 0,005 % 96 ед., следующее по количеству Розалия NEU M 24 0,005 % 91 ед. Выход эксплантов по факту незначительно расходился с прогнозируемыми значениями. С одного каллуса Розалия NEU 6 0,005 % (общая площадь 2,3 см) и Розалия NEU M 24 0,005 % (общая площадь 2,7 см), 91,9 % и 89,6 % соответственно). Мутанты растений Ириде также сформировали прогнозируемое количество эксплантов. Каллус на начальных этапах имел меньшие размеры по сравнению с мутантными растениями Розалия. Полученные экспланты были высажены в субстрат из вермикулита с добавлением питательной среды Элиса для адаптации в условиях *ex vitro*. Условия выращивания: использовались те же фитостеллажи с микроклиматом, после адаптации растения высаживались в открытый грунт в деланки 1 м². Также 50 растений выращивали в вегетативных установках для получения данных пластичности фенотипа растений. В таблице 4 представлены морфофизиологические свойства растений пшеницы в лабораторных условиях мутантов (M1).

Фенотипические признаки растений в деланках имели однородность, что формирует предположение о едином фенотипе без повторных мутаций каллусных тканей во время воздействия фитогормонов. Анализ морфофизиологических особенностей растений мутантов *T. durum* в лабораторных условиях, отображённых в таблице 4, позволяет проявиться генотипической специфической реакции. Реакция на мутагенную обработку сильно варьировала в зависимости от генотипа и примененной концентрации препарата:

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки)

- у сорта Ириде вариант NEU 6 (0,005 %) вызвал максимальный ростовой эффект, увеличив высоту растений на 90 %, по сравнению с контролем.

- у сорта Розалия вариант NEU 24 0,005 % показал значительное увеличение высоты растений (на 14 %), но наиболее значимый эффект данного варианта проявился в увеличении массы 1000 семян на 85 % (51,9 г против 28,1 г в контроле), что является крайне важным селекционным признаком.

Обработки привели к появлению мутантных форм с комплексом хозяйственно-полезных свойств:

- повышение продуктивной кустистости (до 1,9 у Розалии NEU 24);

- увеличение числа зерен в колосе (до 19,9 у Розалии NEU 6 против 16,7 в контроле);

- увеличение массы зерна (вариант Розалия NEU 24), что напрямую указывает на потенциальное повышение урожайности;

Для всесторонней оценки хозяйственной ценности полученных мутантов и реализации их истинной продуктивности ключевое значение имеют дальнейшие исследования в полевых условиях. В таблице 5 представлены морфофизиологические свойства растений пшеницы мутантов M1.

Таблицы 4. Морфофизиологические свойства растений пшеницы в лабораторных условиях мутантов (M1) *T. durum*. (средние показатели)

Мутант	Высота растений, см.	Продуктивная кустистость, шт./растении	Средне количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 семян, г
Контроль (Ириде)	20,4±4,80	1,0±0,2	10,4±2,7	30,4±1,3
Ириде NEU 12 0,01 %	26,4±1,03	1,6±0,4	14,2±2,3	37,1±2,7
Ириде NEU 6 0,005 %	38,8±0,26	1,1±0,9	14,1±1,9	35,3±2,1
Контроль (Розалия)	37,1±6,94	1,1±0,4	16,7±1,3	28,1±1,8
Розалия NEU 6 0,005 %	21,2±0,17	1,3±0,7	19,9±2,5	36,5±2,6
Розалия NEU 24 0,005 %	42,4±0,11	1,9±0,1	18,4±2,7	51,9±1,8

Примечание: данные представлены в виде средних значений со стандартным отклонением ($M \pm SD$).

Полевые испытания мутантных форм (M1) твердой пшеницы способствовали формированию ценных селекционных признаков, которые не могли быть в полной мере реализованы в условиях лабораторного опыта.

Наблюдали комплексное улучшение элементов продуктивности. У варианта Розалия NEU 24 0,005 % зафиксирован рекордный показатель массы 1000 семян, составивший 78,4 г, что на 75 % превышает значения контроля. Параллельно у данной формы отмечено существенное увеличение количества зерен в колосе (до 29,34 шт.) и продуктивной кустистости (2,8). Аналогичная положительная динамика, хотя и менее

выраженная, наблюдалась у мутантов на основе сорта Ириде, где варианты NEU 12 и NEU 6 также достоверно превосходили контроль по всем изучаемым параметрам.

Таблицы 5. Морфофизиологические свойства растений пшеницы в полевых условиях мутантов (M1) *T. durum*

Мутант	Высота растений, см.	Продуктивная кустистость, шт./растении	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 семян, г
Контроль (Ириде)	42,1±2,4	1,2±0,1	18,21±1,6	38,5±1,6
Ириде NEU 12 0,01 %	75,6±2,9	1,7±0,4	23,88±1,1	42,6±0,6
Ириде NEU 6 0,005 %	84,5±1,4	1,7±0,6	23,75±1,7	45,5±0,1
Контроль (Розалия)	98,3±3,7	2,3±0,1	20,11±1,6	44,7±1,9
Розалия NEU 6 0,005 %	59,1±1,01	2,4±0,1	28,94±2,4	56,0±2,0
Розалия NEU 24 0,005 %	105,7±1,3	2,8±0,7	29,34±1,5	78,4±1,3

Примечание: данные представлены в виде средних значений со стандартным отклонением ($M \pm SD$).

В таблице 6 представлены результаты проявления устойчивости к грибковым и бактериальным заболеваниям у мутантов M1. В полевых условиях особое значение имеет существенное снижение поражений для листовых заболеваний. По бурой ржавчине у сорта Ириде лучший вариант (NEU 12 0,01 %) показал снижение поражения на 30,5%, по фузариозу – на 18,6 %, по мучнистой росе – на 6,9 %. У сорта Розалия максимальный эффект достигнут в варианте NEU 24 0,005 %: снижение поражения бурой ржавчиной на 2,9 %, фузариозом на 6,0%, мучнистой росой на 12,6 %. Особого внимания заслуживает снижение поражения септориозом на 4,4 % у данного сорта.

Таблицы 6. Устойчивость грибковым и бактериальным заболеваниям у мутантов (M1) *T. durum*, %

Мутант	Головная пыльная (* (<i>Ustilago tritici</i>))	Бурая ржавчина (* (<i>Puccinia recondita</i>))	Фузариоз грибов рода (* (<i>Fusarium spp.</i>))	Септориоз грибов рода (* (<i>Septoria spp.</i>))	Мучнистая роса (* (<i>Blumeria graminis</i>))	Офиоболезные корневые гнили грибов рода (* (<i>Ophiobolus spp.</i>))
Контроль (Ириде)	1%	40,6%	24,3%	15,3%	16,1%	5%
Ириде NEU 12 0,01 %	0%	10,1%	5,7%	11,2%	9,2%	0%
Ириде NEU 6 0,005 %	0%	14,2%	20,4%	7,3%	11,8%	0%
Контроль (Розалия)	4%	20,7%	15,6%	16,1%	24,1%	2%
Розалия NEU 6 0,005 %	1%	24,3%	11,7%	13,8%	14,9%	4%
Розалия NEU 24 0,005 %	0%	17,8%	9,6%	11,7%	11,5%	0%

Примечание: * – процент растений, зараженных из 100 шт.

Наиболее выраженный положительный эффект отмечен в отношении таких опасных заболеваний, как пыльная головня и офиоболезные корневые гнили.

Обсуждение

Проведённые исследования позволили разработать эффективную методику микроклонального размножения *Triticum durum* Desf., интегрированную в схему индуцированного мутагенеза. Ключевым этапом являлся подбор питательной среды, так как реакция эксплантов злаков на гормональный состав существенно варьирует [12]. В экспериментах наилучшей средой для каллусогенеза оказалась MSI 7 (6-БАП, НАА, ИМК). Высокая эффективность данной комбинации объясняется синергическим действием ауксинов (НАА, ИМК) и цитокинина (6-БАП), что, согласно литературным данным, стимулирует дедифференцировку клеток незрелых зародышей и индукцию эмбриогенного каллуса [13]. Интересно, что среда MSI 3, не содержащая ауксинов в высокой концентрации, но включающая кинетин и гибберелловую кислоту, оказалась оптимальной для последующей регенерации (органогенеза), что подтверждает необходимость смены гормонального баланса при переходе от каллусогенеза к органогенезу [7].

Применение метода гистологического прогнозирования с окрашиванием толудиновым синим позволило с высокой точностью (до 92 %) предсказать выход эксплантов. Такой подход, основанный на идентификации меристематических очагов (эмбриогенных единиц), ранее был успешно апробирован на рисе [8]. Результаты на *T. durum* подтверждают универсальность этого метода для злаковых культур. Выявленная корреляция между площадью меристематических зон и регенерационным потенциалом каллуса позволяет проводить раннюю отбраковку нерегенерационноспособных линий, что значительно экономит ресурсы и время.

Обработка мутагеном NEU привела к появлению широкого спектра морфофизиологических изменений, что согласуется с данными о мутагенных свойствах нитрозосоединений [14, 15]. Сравнение лабораторных и полевых данных демонстрирует ключевую роль условий выращивания в реализации фенотипа. Так, у мутанта Розалия NEU 24 0,005 % масса 1000 семян в лаборатории составила 51,9 г, тогда как в поле достигла 78,4 г. Это превышает не только контрольный сорт, но и средние показатели многих районированных сортов яровой твёрдой пшеницы [16], что подчёркивает огромный селекционный потенциал данной линии. Столь значительная прибавка может быть связана с мутационным изменением генов, контролирующих накопление крахмала и запасных белков в эндосперме [10].

Помимо этого выявляется разнонаправленность действия мутагена в зависимости от генотипа. У сорта Ириде максимальный ростовой эффект (высота растений 84,5 см в поле) достигнут при концентрации NEU 0,005 % (вариант 6) в то время, как у сорта

«Розалия» та же концентрация (вариант 6) привела к снижению высоты растений на 40 % относительно контроля, но стимулировала увеличение озерненности колоса. Это свидетельствует о генотипической специфичности реакции на химический мутагенез, что необходимо учитывать при планировании селекционных программ [11].

Одним из наиболее ценных практических результатов является повышение устойчивости мутантов к грибным патогенам. Полное отсутствие поражения пыльной головней (*Ustilago tritici*) и офиоболезными гнилями (*Ophiobolus spp.*) у большинства мутантных линий может быть следствием индуцированных мутаций в генах, ответственных за синтез фитоалексинов или компонентов клеточной стенки, либо за запуск реакций сверхчувствительности [17]. Снижение восприимчивости к бурой ржавчине и фузариозу у линии Ириде NEU 12 0,01 % также является важным селекционным достижением, так как эти заболевания ежегодно наносят значительный урон урожаю в климатических условиях Беларуси [18]. Можно предположить, что мутагенная обработка затронула регуляторные гены, контролирующие устойчивость к широкому спектру патогенов, что привело к появлению форм с групповой устойчивостью [19].

Питательные среды с добавлением фитогормонов MSI 1, MSI 2, MSI 3, MSI 6 способствовали росту растений без образования каллуса, при этом во всех вариантах кроме MSI 3 рост не продуцировался, растения замирали в одной стадии развития, но не погибали, через некоторое время рост возобновлялся. Кроме того, некоторые гормоны стимулировали и рост растения и каллусогенез одновременно (MSI 4, MSI 5 и MSI 8). На основании полученных данных эффективнее всего для активного каллусогенеза *T. durum* следует применять питательную среду MSI 7, а для возобновления регенерантов (органогенеза) из каллуса – среду MSI 3.

При выводе растений в условия *ex vitro*, несмотря на ограничения, связанные с искусственным освещением и невозможностью полной реализации генетического потенциала мутантных форм, продемонстрировали высокую воспроизводимость и однородность результатов внутри вариантов опыта. Это подтверждает стабильность индуцированных изменений и позволяет считать выявленные закономерности достоверными.

Важным фактором, определяющим уровень урожайности сельскохозяйственных культур, является устойчивость растений к патогенам. Способность противостоять заболеваниям напрямую влияет на формирование элементов продуктивности и конечную урожайность. Устойчивость к патогенам является ключевым компонентом продуктивности растений, поскольку непосредственно влияет на сохранность фотосинтетического аппарата, эффективность накопления ассимилятов и формирование репродуктивных органов. Во всех опытных вариантах, за исключением Розалия NEU 6 0,005 %, наблюдалось полное

отсутствие поражения этими патогенами (0 % заражений) в то время, как в контроле уровень поражения достигал 1...5 %. Это свидетельствует об индукции мутагеном высокой устойчивости к почвенным и семенным патогенам.

Сочетание индуцированного мутагенеза с последующим микроклональным размножением отобранных форм позволяет не только сохранить уникальные генотипы, но и быстро нарастить их количество для полевых испытаний. Это существенно ускоряет селекционный процесс по сравнению с классическими методами отбора, особенно при работе с рецессивными мутациями [20]. Разработанная методика может быть рекомендована для включения в программы по созданию адаптированных к местным условиям высокопродуктивных сортов твёрдой пшеницы.

Закключение

Проведённые комплексные исследования подтвердили высокую эффективность применения индуцированного мутагенеза в сочетании с биотехнологическими методами для селекции твёрдой пшеницы в условиях северо-востока Республики Беларусь. Разработанная методика микроклонального размножения позволила сохранить и размножить ценные мутантные формы с уникальными хозяйственно-полезными признаками.

Экспериментально установлено, что оптимальной питательной средой для каллусогенеза у *Triticum durum* является среда MSI 7 с добавлением 6-БАП (0,1 мл/л), NAA (0,2 мл/л) и ИМК (0,2 мл/л), обеспечивающая до 91 % образования каллуса. Для последующего органоогенеза наиболее эффективной показала себя среда MSI 3. Разработанный метод гистологического прогнозирования образования эксплантов с расчетом эмбриогенных единиц (EU) показал высокую надёжность с точностью до 89,6...91,9 %.

Мутагенная обработка NEU позволила получить формы с комплексом ценных признаков. Наибольший интерес представляют мутанты:

Розалия NEU 24 0,005 % с рекордной массой 1000 семян (78,4 г в полевых условиях), повышенной продуктивной кустистостью (2,8) и устойчивостью к заболеваниям

Ириде NEU 6 0,005 % с увеличенной высотой растений (84,5 см) и улучшенными показателями продуктивности

Полевые испытания подтвердили стабильность индуцированных изменений и полную реализацию генетического потенциала мутантных форм. Отмечено комплексное улучшение элементов продуктивности и повышение устойчивости к основным патогенам, особенно к пыльной головне и офиоболезным корневым гнилям.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования разработанного биотехнологического подхода для ускорения селекционного процесса создания новых высокопродуктивных

сортов твёрдой пшеницы, адаптированных к условиям Республики Беларусь.

Литература

1. Овэс Е. В., Гаитова Н. А., Шишкина О. А. Сохранение сортовых ресурсов картофеля в полевой и *in vitro* коллекциях Федерального исследовательского центра картофеля имени АГ Лорха // Биотехнология и селекция растений. 2022. Т. 5. №. 1. С. 28-41.
2. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture // *Physiologia Plantarum*. 1962. No. 15. P. 473-497. doi:10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
3. Development of highly *in vitro* callogenesis and regeneration system for some salt tolerant rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of Bangladesh / M. Al-Forkan, M.A. Rahim et al. // *Biotechnology*. 2005. Vol. 4. P. 230-234. doi:10.3923/biotech.2005.230.234
4. Development of highly *in vitro* callogenesis and regeneration system for some salt tolerant rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of Bangladesh / M. Al-Forkan, M.A. Rahim et al. // *Biotechnology*. 2005. Vol. 4. P. 230-234. doi:10.3923/biotech.2005.230.234
5. Response of immature and mature embryos of modern Egyptian commercial durum (*Triticum durum* Desf.) and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) for *in vitro* culture / Shaheen G. et al. // *Journal of Modern Research*. 2024. No. 2. P. 83-91. doi:10.21608/jmr.2024.266687.1121
6. Benlioglu B., Ozgen M. *In vitro* selection of drought tolerant regenerants in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2021. No. 3. P. 1813-1825. doi:10.15666/aeer/1903_18131825
7. Vitti A. Exploring the agronomic traits, antioxidant and antifungal properties of *Hermetia illucens* frass extract in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) // *BMC Plant Biology*. 2025. No. 1. P. 1075.
8. Круглова Н. Н., Титова Г. Е., Сельдиминова О. А. Каллусогенез как путь морфогенеза *in vitro* у злаков // Онтогенез. 2018. Т. 49. №. 5. С. 273-288.
9. Histo-morphological analysis of rice callus cultures reveals differential regeneration response with varying media combinations / B. Ijaz, C. Sudiro et al. // *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 2019. No. 55. P. 569–580. doi: 10.1007/s11627-019-09974-6
10. Налётов И. В., Заяц В. С. Гомеозис кукурузы сахарной под воздействием экологических факторов среды Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века. Минск: ИВЦ Минфина, 2024. Ч. 2. С. 34-36.
11. Efferth, T. Biotechnology applications of plant callus cultures / T. Efferth // *Engineering*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 50-59. doi:10.1016/j.eng.2018.11.006
12. Налетов И. В., Дуктова Н. А, Заяц В. С. Изменение количества фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы твердой при воздействии химических мутагенов // Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур. сборник статей по

материалам XXI Международной научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, БГСХА. Горки. 2023. С. 162-165.

13. Налетов И. В., Заяц В. С. Активность различных форм белка мутантных образцов яровой пшеницы твёрдой *Triticum durum* Desf // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. №. 3. С. 139-141.

14. Налетов И. В. Содержание запасных белков в мутантных формах яровой пшеницы твёрдой *Triticum durum* Desf. // Настоящее и будущее биотехнологии растений Материалы Международной научной конференции, посвященной 65-летию деятельности Отдела биохимии и биотехнологии растений ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», Минск 2023 год. Минск, 2023. С. 82.

15. Заяц В. С., Юницкий А. Э., Налетов И. В. Метод выращивания каллусных тканей зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum* L.) с целью получения флавоноидов и гиперидинов // Сборник материалов VI международной научно-практической online-offline конференции «Биотехнология: достижения и перспективы развития» г. Пинск, 30 ноября – 1 декабря 2023. С. 87-89.

16. Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь. Минск, 2024. 275 с.

17. Chauhan H., Desai S. A., Khurana P. Comparative analysis of the differential regeneration response of various genotypes of *Triticum aestivum*, *Triticum durum* and *Triticum dicoccum* // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2007. Vol. 91. No. 3. P. 191-199.

18. Грибные патогены зерновых колосовых культур: биология, распространение, вредоносность, методы учета, сбора и хранения биоматериала. Создание искусственных инфекционных фонов: Научно-практические рекомендации / Г. В. Волкова, Я. В. Яхник, О. А. Кудинова и др. Краснодар: Издательство ООО «Просвещение-Юг». 2024. 98 с.

19. Evaluation of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using in vivo and in vitro techniques / E. Farshadfar, B. Jamshidi, K. Cheghamirza, et al. // Annals of Biological Research. 2012 Vol. 3 No. 1 P. 465-476.

20. Benlioglu B., Ozgen M. In vitro selection of drought tolerant regenerants in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) // Appl Ecol Environ Res. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 1813-1825.

References

1. Oves E. V., Gaitova N. A., Shishkina O. A. Conservation of potato varietal resources in field and in vitro collections of the A. G. Lorch Federal Potato Research Center // Biotechnology and Plant Breeding. 2022. Vol. 5. No. 1. P. 28-41.

2. T. Murashige, F. Skoog A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture //

Physiologia Plantarum. 1962. No. 15. P. 473-497. doi:10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.

3. Development of highly in vitro callogenesis and regeneration system for some salt tolerant rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of Bangladesh / M. Al-Forkan, M.A. Rahim et al. // Biotechnology. 2005. 4. P. 230-234. doi:10.3923/biotech.2005.230.234

4. Shaheen G. Response of immature and mature embryos of modern Egyptian commercial durum (*Triticum durum* Desf.) and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) for in Vitro culture // Journal of Modern Research. 2024. No. 2. P. 83-91. doi:10.21608/jmr.2024.266687.1121

5. In vitro selection of drought tolerant regenerants in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) / B. Benlioglu, M. Ozgen // Applied Ecology and Environmental Research. 2021. No. 3. P. 1813-1825. doi: 10.15666/aeer/1903_18131825

6. Vitti A. Exploring the agronomic traits, antioxidant and antifungal properties of *Hermetia illucens* frass extract in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) // BMC Plant Biology. 2025. No. 1. P. 1075.

7. Kruglova N. N., Titova G. E., Seldimirova O. A. Callusogenesis as a pathway of in vitro morphogenesis in cereals // Ontogenesis. 2018. Vol. 49. No. 5. P. 273-288.

8. Histo-morphological analysis of rice callus cultures reveals differential regeneration response with varying media combinations / B. Ijaz, C. Sudiro et al. // In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant. 2019. No. 55. P. 569-580. doi: 10.1007/s11627-019-09974-6.

9. Naletov I. V., Zayats V. S. Homeosis of sweet corn under the influence of environmental factors. Sakharov Readings of 2024: Environmental Problems of the 21st Century. Minsk: Institute of Plant Genetics and Information Technology of the Ministry of Finance, 2024. Part 2. P. 34-36.

10. Налётов И.В., Заяц В.С. Гомеозис кукурузы сахарной под воздействием экологических факторов среды Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века. Минск: ИВЦ Минфина, 2024. Ч. 2. С. 34-36.

11. Efferth T. Biotechnology applications of plant callus cultures // Engineering. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 50-59. doi: 10.1016/j.eng.2018.11.006

12. Naletov, I.V. N.A. Duktova, V.S. Zayats Change in the amount of photosynthetic pigments in durum wheat leaves under the influence of chemical mutagens // Technological aspects of agricultural crop cultivation. Collection of articles based on the materials of the XXI International Scientific and Practical Conference. Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, Belarusian State Agricultural Academy. Gorki 2023. Gorki, 2023. P. 162-165.

13. Naletov I. V. Activity of various protein forms of mutant samples of spring hard wheat *Triticum durum* Desf / I.V. Naletov, V.S. Zayats // Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2023. No. 3. P. 139-141.

14. Naletov I. V. Content of storage proteins in mutant forms of spring hard wheat *Triticum durum* Desf. //

The present and future of plant biotechnology. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 65th anniversary of the Department of Plant Biochemistry and Biotechnology of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 2023. P. 82.

15. Zayats V. S. Method of growing callus tissues of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) to obtain flavonoids and hypericins / V. S. Zayats, A. E. Yunitskiy, I. V. Naletov // Collection of materials of the VI international scientific and practical online-offline conference "Biotechnology: achievements and development prospects" Pinsk, November 30 – December 1, 2023. – C. 87-89.

16. State Register of Varieties and Tree and Shrub Species of the Republic of Belarus. Minsk, 2024. 275 p.

17. Chauhan H., Desai S. A., Khurana P. Comparative analysis of the differential regeneration response of various genotypes of *Triticum aestivum*, *Triticum durum*

and *Triticum dicoccum* // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2007. Vol. 91. No. 3. P. 191-199.

18. Fungal pathogens of cereal crops: biology, distribution, harmfulness, methods of recording, collecting and storing biomaterial. Creation of artificial infectious backgrounds: Scientific and practical recommendations / G. V. Volkova, Ya. V. Yakhnik, O. A. Kudinova et al.. Krasnodar: Publishing house OOO "Prosveshchenie-Yug", 2024. 98 p.

19. Evaluation of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using in vivo and in vitro techniques / E. Farshadfar, B. Jamshidi, K. Cheghamirza, et al. // Annals of Biological Research. 2012. Vol. 3 No. 1 P. 465-476.

20. Benlioglu B., Ozgen M. In vitro selection of drought tolerant regenerants in durum wheat (*Triticum durum* desf.) // Appl Ecol Environ Res. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 1813-1825. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1903_18131825.

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-49-55

УДК 633.11"321":632.95:631.445.25 (470.333)

Биоэкономический эффект применения пестицидов на агроценозах яровой пшеницы в условиях серых лесных почв Брянской области

С. А. Бельченко✉, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Агрономия, селекция и семеноводство»

С. М. Сычев, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Агрономия, селекция и семеноводство»

Г. П. Молявко, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Агрохимия, почвоведение и экология»

ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет

243365, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, 2а

✉sabel032@rambler.ru

Резюме. В статье представлены результаты оценки биоэкономической эффективности применения пестицидов при защите агроценозов яровой пшеницы. Научные эксперименты проведены на опытном поле Брянского ГАУ (2023-2025 гг.). Объект исследований – 10 (десять) новых сортов яровой пшеницы, из них: раннеспелых – 3: Русалина, Дарья, Лиамеро; среднеспелых – 6: Беяна, Радмира, Марфа, Токката, Эврика, Калико и один – среднепоздний: Ладыя. Основная цель – дать оценку биологической и экономической эффективности применения комплексной защиты агроценозов яровой пшеницы при использовании препаратов: протравители – Байсайд, ВСК; Табу Нео, СК; гербициды – Балерина Супер, СЭ; Ластик Экстра, МКЭ; фунгициды – Ракурс, СК; Балий, КМЭ; инсектициды – Борея Нео, СК; регулятор роста – Регги. При проведении защитных химических мероприятий на агроценозах яровой пшеницы был установлен биологический эффект применения гербицидов, фунгицидов и инсектицидов изучаемой культуры на 95...100 %. При этом следует отметить, что при внесении фунгицидов и инсектицидов (Байсайд, ВСК 1,5 л/га) + Табу Нео, СК (0,7 л/га); Ракурс, СК (0,4 л/га) + Борея Нео, СК (0,2 л/га) и Балий, КМЭ (0,8 л/га) + Борея Нео, СК (0,2 л/га) установлена биологическая эффективность: на 10 день после обработки – 95 %, а на 20 – 100 %. При внесении пестицидов, обладающих высокой биоэкономической эффективностью, на контроле получен урожай зерна яровой пшеницы по 6,18 т/га, а в варианте 2 (при полной схеме защиты, включая регулятор роста) – по 5,73 т/га. Достоверная прибавка к контролю составила + 0,43 т/га, чистый доход составил 55,96 тыс. руб./га, а рентабельность – 152 %.

Ключевые слова: яровая пшеница, сорт, система химической защиты, продуктивность, биоэкономическая эффективность.

Для цитирования: Бельченко С. А. Сычев С. М., Молявко Г. П. Биоэкономический эффект применения пестицидов на агроценозах яровой пшеницы в условиях серых лесных почв Брянской области // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 49-55. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-49-55

The bioeconomic effect of using pesticides on spring wheat agroecosystems in the gray forest soils of the Bryansk region

S. A. Belchenko✉, **S. M. Sychev**, **G. P. Molyavko**

Bryansk state agrarian university

243365, Bryansk Region, Vygonichsky District, Kokino Village, Sovetskaya Street, 2a

✉sabel032@rambler.ru

Abstract. The article presents the results of assessing the bioeconomic efficiency of using pesticides in the protection of spring wheat agroecosystems. Scientific experiments were conducted on the experimental field of the Bryansk State Agrarian University (2023-2025). The main goal is to assess the biological and economic effectiveness of the use of integrated protection of spring wheat agroecosystems when using preparations: mordants - Bayside, VSK; Tabu Neo, SK; herbicides - Ballerina Super, SE; Eraser Extra, FE; fungicides - Rakurs, SK; Baliy, KME; insecticides - Borey Neo, SK; regulator Growth - Reggae, VRK using August products. The cost of purchasing varietal seeds is justified only if all elements of agricultural technology are followed. The complete (integrated) plant protection system for spring wheat used in regional cultivation technology is one of the necessary tools for increasing productivity. Disruption of one of the elements of agricultural technology can lead to a disruption of the system approach and, consequently, to a significant decrease in the productivity of any grain crop. In scientific studies, the biological effect of the use of herbicides, fungicides, and insecticides on the studied crop was found to be 95-100%. At the same time, it should be noted that when applying fungicides and insecticides (Bayside, VSK 1.5 l/ha)

+Tabu Neo, SK (0,7 l/t); Rakurs, SK (0,4 l/ha) + Borei Neo, SK (0,2 l/ha) and Baliy, KME (0,8 l/ha Borei Neo, SC (0,2 l/ha) established biological efficacy: 95 % on the 10th day after treatment, and 100 % on the 20th. When applying pesticides with high bioeconomic efficiency, the yield of spring wheat grain was 6,18 t/ha in the control, and 5,73 t/ha in variant 2 (with a full protection scheme, including a growth regulator). The significant increase compared to the control was (+0,43 t/ha of grain), with a net income of 55,96 thousand rubles/ha and a profitability of 152 %.

Keywords: spring wheat, variety, chemical protection system, productivity, and bioeconomic efficiency.

For citation: Belchenko S. A. Sychev S. M., Molyavko G. P. The bioeconomic effect of pesticide application on spring wheat agrocenoses in the conditions of gray forest soils of the Bryansk region // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026; 1 (73): 49-55 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-49-55

Введение

Одним из интенсивно развивающихся регионом АПК в Российской Федерации является Брянская область. Об этом свидетельствуют положительная динамика, достигнутая при применении научно обоснованных методов ведения хозяйственной деятельности, своевременно проведенная модернизация ряда производственных процессов, применение инновационных региональных технологий с рациональным использованием имеющихся материально-технических ресурсов.

В 2024 г., несмотря на непростые условия деятельности предприятий агропромышленного комплекса, особенно в приграничных районах, майские заморозки и засушливую осень, получен хороший урожай: в хозяйствах всех категорий собран урожай зерна 1,9 млн. тонн, вместе с масличными культурами – 2,3 млн. тонн. Средняя урожайность зерновых и зернобобовых культур по области – 62,6 ц/га. За последние 10 лет производство зерна увеличено в 2 раза. На 1 октября 2025 г. производство зерна составило 871,8 тыс. тонн, что на 13 % больше, чем за аналогичный период 2024 г. По прогнозу в 2025 г. производство зерна составит 1,9 млн. тонн, вместе с масличными – 2,4 млн. тонн.

В настоящее время сельхозпредприятия АПК уделяют внимание возделыванию высоко маржинальных культур. В 2025 г. производство масличных культур составило 450,6 тыс. тонн, в том числе рапса собрано 310,6 тыс. тонн, что на 10 процентов больше прошлогоднего показателя, сои – 109,6 тыс. тонн (в 1,5 раза больше). За 10 лет производство масличных культур увеличено почти в 11 раз, в том числе рапса – в 7,3 раза, сои – в 11 раз. На отдельных полях урожайность озимого рапса достигает 70 ц с гектара. По прогнозу в 2025 г. производство масличных культур составит 451 тыс. тонн [1, 2, 3].

Сегодня среди яровых зерновых производство яровой пшеницы как на федеральном, так и на региональном уровнях занимает одно из ведущих мест при возделывании изучаемой культуры. В структуре яровых зерновых культур области яровая пшеница занимает 3,4 % посевных площадей. Валовое производство яровой пшеницы в истекшем году по региону составило в пределах 339,3 тыс. тонн при урожайности 5, 3 т/га. В последние годы расширяется спектр агрохимических препаратов, применяемых для комплексной защиты яровой пшеницы (*ver triticum*.) от сорняков, вредителей и болезней, открывая тем

самым дополнительные возможности проведения химических защитных мероприятий [4, 5, 6].

По мнению ученых ФГБОУ ВО Курганской ГСХА Поставалова А.А., Сухановой С.Ф.(2020) и др., научных сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВНИИЗР) Власовой Л.М. Поповой О.В. (2021, 2024) эффективность предпосевной обработки семян яровых зерновых (яровая пшеница и др.) фунгицидами и применения баковых инсекто-фунгицидных смесей для защиты изучаемой культуры достоверно увеличивают урожайность яровой пшеницы от 10 до 17,5 % и обеспечивают высокую биоэкономическую эффективность. В Липецкой области была проведена сравнительная оценка эффективности наиболее распространенных химических средств защиты растений разных фирм с целью составления наиболее рациональной системы защиты посевов яровой пшеницы. Выявлено, что препараты разных фирм показывают разную эффективность. В результате исследования определены наиболее эффективные протравители семян, гербициды, фунгициды, инсектициды, что позволяет составить эффективную комплексную систему защиты посевов яровой пшеницы [7, 8, 9].

Цель исследований – оценка биологической и экономической эффективности действия пестицидов при химической защите агроценозов яровой пшеницы.

Материалы и методы

Полевые исследования проведены в условиях длительного стационарного опыта в ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет - Брянская область, Выгоничский муниципальный р-он, с./пос. Кокино, на серых лесных среднесуглинистых почвах на площади посева яровой пшеницы 8 га. Почва имеет следующие агрохимические характеристики: наличие гумуса (3,66...3,79 %), подвижных форм фосфора – 300...302 мг/кг почвы и обменного калия – 261...268 мг/кг, pH почвы – 5,5...5,7. Предшественник: картофель. Обработка почвы: вспашка с боронованием, культивация и предпосевная обработка почвы. Внесение удобрений: осенью – азофоска – 400 кг/га, весной- подкормка 100 кг/га аммиачной селитры. Срок сева: II декада 04. 2023-25 гг. Семена высевали сеялкой СПУ-4,2 с междурядьями 15 см. Норма высева семян- 4,5 млн. шт./га. Время появления всходов- III декада 04. 2023-25 гг. Дополнительно уход за посевами включал: листовые подкормки удобрениями с микроэлементами, обработку пестицидами против сорняков, болезней и вредителей. Уборку и учет

(деляночный метод) урожая зерновых культур (ячмень) осуществляли способом прямого обмолота комбайном «Terrior».

Закладку и статистическую обработку полученных результатов проводили по методике Б. А. Доспехова. (Б. А. Доспехов. *Методика полевого опыта* 5-е изд. Москва, Агропромиздат. 1985. 351 с.) и программой SNEDECOR. Проводили расчёты по определению биологической урожайности (*Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. М. А. Федин и др., 1989. 194 с.*), биологической эффективности (*Методические указания по регистрационным испытаниям пестицидов в части биологической эффективности. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 80 с.*) Экономическую эффективность применения средств защиты растений рассчитывали по рекомендации А.Ф. Ченкина: (Ченкин А. Ф. *Экономика и организация защиты растений. М.: Колос, 1974. 287 с.*) и использовали SWOT- анализ.

Схема опыта:

Вариант 1 – (контроль) – химзащита яровой пшеницы без обработки регулятором роста.

Вариант 2 – полная химзащита яровой пшеницы (фунгициды, гербициды и инсектициды) + росторегулятор

Результаты

Существенное влияние как на рост и развитие растений, так и на развитие болезней и рост численности вредителей оказывают агроклиматические условия региона.

Так, в 2023 г. погодные условия вегетационного периода были не совсем типичными для Брянской области и отличались крайней разбалансированностью. Периоды теплой погоды вдруг сменялись резким похолоданием, а влагообеспеченность в мае, июле и сентябре почти в 2 раза превышала средние многолетние значения (рис.1).

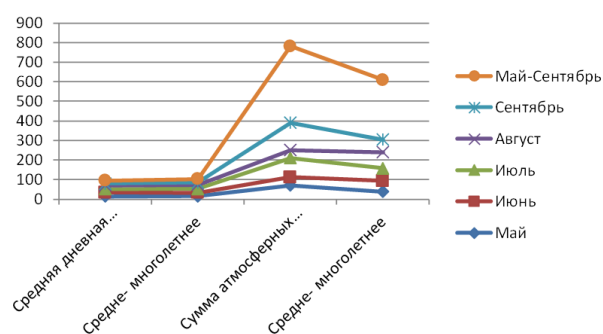


Рис. 1. Характеристика метеорологических условий вегетационного периода, 2023 г.

В мае средняя температура была на уровне среднемноголетней, при этом осадков выпало почти в 2 раза больше нормы – 71 мм. Такая погода благоприятствовала быстрому развитию сорной растительности.

Июнь характеризовался теплой погодой с умеренным увлажнением, однако прошедшие дожди

носили ливневый характер. В мае-июне проводили основные защитные мероприятия для недопущения гибели растений от вредных объектов и сохранения будущего урожая.

В целом 2023 г. практически с апреля до конца лета был теплым, погода благоприятствовала росту и развитию растений (рис. 2).

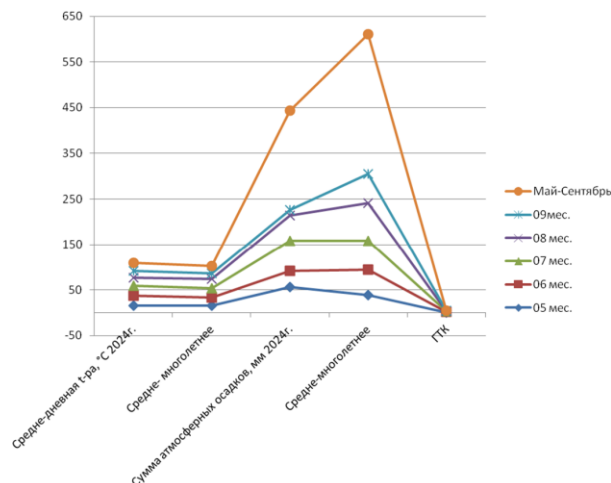


Рис. 2. Метеоданные в период вегетации растений, 2024 г.

С июня и по сентябрь 2024 г. наблюдали воздушную и почвенную засуху. Июньская засуха негативно отразилась на развитии изучаемой культуры, что способствовала массовому распространению вредных объектов, об этом свидетельствуют данные ГТК, которые были ниже на 0, ед.

Исключение составила природно-климатическая аномалия: в 2024 г. количество выпавших осадков за весь вегетационный период оказалось практически в 2 раза меньше среднемноголетнего показателя за 2 предыдущих года.

Погодные условия в вегетационный период различались количеством выпавших осадков и температурой воздуха, что отражает гидротермический коэффициент (рис. 3).

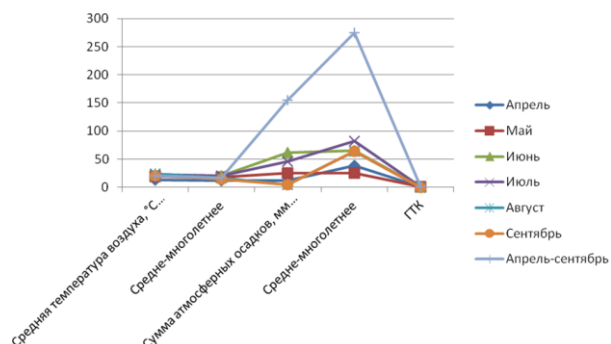


Рис. 3. Метеоданные в период вегетации растений, 2025 г.

Метеоусловия 2025 г. благоприятствовали росту и развитию как яровой пшеницы, так и быстрому развитию сорной растительности.

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

Система полной химической защиты посевов яровой пшеницы представлена следующими препаратами АО Фирмы «Август»: протравители – Байсайд, ВСК; Табу Нео, СК; гербициды – Балерина Супер, СЭ; Ластик Экстра, МКЭ; фунгициды – Ракурс, СК; Балий, КМЭ; инсектициды – Борей Нео, СК; регулятор роста – Регги, ВРК (табл.1)

Таблица 1. Применение гербицидов на агроценозах яровой пшеницы 2023-2025 гг.

Наименование препарата	Норма расхода л./га, кг/га	Вредный объект	Способ и сроки обработки
Байсайд, ВСК+ Табу Нео, СК	1,5 л/т + 0,7 л/т	Виды головни, корневые гнили, злаковые мухи, хлебные блошки	Протравливание семян непосредственно перед посевом
Балерина Супер, СЭ	0,5 л/га	Однолетние и некоторые многолетние двудольные сорняки	Опрыскивание посевов в фазе кущения культуры и ранние фазы роста сорняков.
Ластик Экстра, МКЭ	1,0 л/га	Однолетние злаковые сорняки	Опрыскивание в ранние фазы роста сорняков (2-3 листа), независимо от фазы развития культуры
Регги, ВРК	1,0 л/га	Предотвращение полегания	Опрыскивание посевов в фазе начала выхода в трубку
Ракурс, СК	0,4 л/га	Мучнистая роса, желтая ржавчина, пиренофороз, септориоз листьев	Опрыскивание посевов при появлении первых признаков заболевания (расход рабочей жидкости -300 л/га)
Балий, КМЭ	0,8 л/га	Ржавчины, мучнистая роса, септориоз, пиренофороз	Опрыскивание посевов при появлении первых признаков заболевания (расход рабочей жидкости -300 л/га)
Борей Нео, СК (дважды)	0,2 л/га	Клоп вредная черепашка, тли, хлебные жуки, трипсы, блошки.	Опрыскивание посевов в период вегетации при проявлении вредителей
Контроль (химзащита без обработки регулятором роста)			

Примечание: метеоусловия на день обработки: пасмурно, дневная температура + 21°C, ветер 3-5 м/сек

1. Технология применения гербицидов: начало обработки – 15-20.05.2023-25г.; способ обработки - наземное опрыскивание; используемая аппаратура - ОП-2000; расход рабочей жидкости – 200 л/га; фаза развития культуры - кущение.

2. Вредные объекты, против которых применяли гербициды: пикульник обыкновенный, ромашка (виды), резушка таля, марь белая, горец почечуйный,

метлица обыкновенная, просо куриное. Даты учета засоренности: до обработки – 15-20. 05.2023-25 гг., после обработки – 25-28.05.2023-25 гг., 06-08.06.2023-25 гг.

3. Фитотоксичности после применения баковой смеси препаратов на культурах не наблюдали.

4. После обработки биологическая эффективность препаратов составила от 90 % на пикульнике, при этом, выживание пикульника зависело от фазы его развития в момент обработки до 100 % у других сорняков. При 3...4 листьях растение угнеталось, но не погибало, а в некоторых случаях возобновляло рост. Сильное угнетение других сорняков наступило уже на 7...10 день после применения гербицидов, а их полная гибель на всех изучаемых культурах продолжалась в течение месяца. Усредненная биологическая эффективность в среднем за три года составила 93 %. Результаты испытаний представлены на рисунке 4

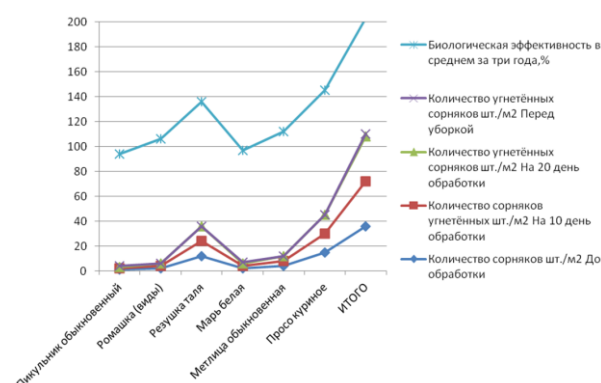


Рис. 4. Биологическая эффективность применения гербицидов на посевах яровой пшеницы, 2023-2025гг. Препараты: (Балерина Супер, СЭ (0,5 л/га), + Ластик Экстра, МКЭ (1,0 л/га) +Регги, ВРК (1,0 л/га)

К моменту уборки на всей площади визуально были видны лишь несколько растений вьюнка полевого, которые появились уже после применения гербицидов и постепенно отрастали. Также, в нижнем ярусе, в состоянии угнетения находились единичные растения пикульника обыкновенного и марь белой. Другой сорной растительности не наблюдалось.

Фунгицидная и инсектицидная обработка.

Технология применения: протравливание семян непосредственно перед посевом – 10-12.04.2023-25гг; опрыскивание ОП-2000 - 15-18.05.2023-25, 25-27.05.2023-25и 19-21.06.2023-25; расход рабочей жидкости – 300 л/га; фаза развития культуры в момент обработки – начало выхода в трубку, начало колошения, колошение.

Вредные объекты:

- болезни – виды головни, сетчатая, темно-бурая пятнистость, ринхоспориоз;
- вредители – хлебные блошки, тли, клоп вредная черепашка и др.

Протравливание семян перед посевом препаратом: Байсайд, ВСК (1,5 л/га) + Табу Нео, СК (0,7 л/т) благоприятно сказалось на фитосанитарном состоянии посевов яровой пшеницы. В течение вегетации не было обнаружено никаких видов головни и корневых гнилей, а также практически отсутствовали вредители на этапе всходов.

Развитие других заболеваний полностью прерывалось своевременными фунгицидными обработками. Применение фунгицидов Ракурс, СК и Балий, КМЭ позволило не допустить распространения и развития темно-бурой, сетчатой пятнистости и ринхоспориоза, что свидетельствует о высокой результативности такой обработки. Флаговый и подфлаговый лист у зерновых сохранился в здоровом состоянии до биологической зрелости растений (рис. 5)

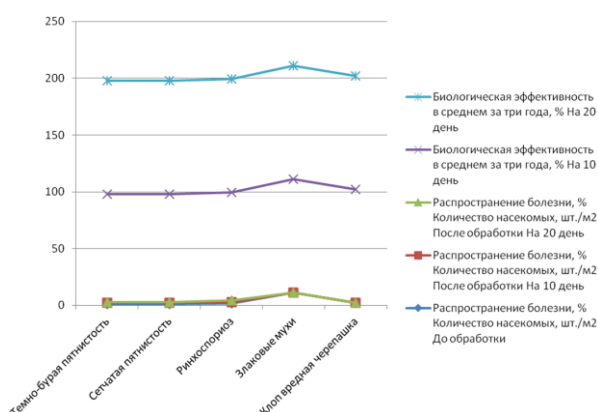


Рис. 5. Биологическая эффективность применения фунгицидов на посевах яровой пшеницы, 2023-2025 гг. Препараты: (Байсайд, ВСК (1,5 л/га) + Табу Нео, СК (0,7 л/т); Ракурс, СК (0,4 л/га) + Борея Нео, СК(0,2 л/га) и Ба

Применяемая система защиты яровой пшеницы от сорняков, болезней и вредителей позволила получить высокую биологическую продуктивность (табл. 2)

Благодаря применению инсектицидов (при протравливании и по вегетации) не наблюдалось даже малейшего повреждения растений различными вредителями. Соответственно их вредоносность была сведена к нулю, и получена высокая урожайность.

Средний показатель урожайности по опыту составил 6,18 т/га. Раннеспелые сорта в среднем с каждого гектара дали по 6,37 тонн, среднеспелые по – 6 29 т/га. Более высокие показатели сложились у сортов: раннеспелых: сорта Ликамеро – 7,15 т/га, из среднеспелых – у сортов Токката – 7,00 т/га; Эврика – 6,98 т/га и Каликсо – 6,95 т/га.

В таблице 3 показаны параметры урожайности яровой пшеницы. На контрольном варианте (1) получена урожайность 5,73 т/га. Применение пестицидов + регулятор роста (вар.2), то есть полной химзащиты растений в 2023-2025 гг. обеспечило достоверную прибавку по урожайности яровой пшеницы (+ 0,43 т/га).

Таблица 2. Биологическая урожайность яровой пшеницы (2023-2025 гг.)

Сорт	Масса 1000 се- мян, г	Натура, г/л	Урожайность, т/га		
			Вариант-I химзащита без обработки регулятором	Вариант-II полная химзащита	Прибавка (+) к контролю
Пшеница яровая					
раннеспелые					
Русалина	42,5	710	5,42	5,70	0,28
Дарья	45,2	685	5,32	5,98	0,34
Ликамеро	44,6	745	6,50	7,15	0,79
в среднем	44,1	713	5,74	6,27	0.47
НСР 05			0,128		
Среднеспелые					
Беляна	44,2	680	5,29	5,58	0.29
Радмира	45,0	700	5,31	5,62	0,31
Марфа	44,6	705	5,30	5,66	0,33
Токката	44,8	740	6,35	7,00	0,65
Эврика	43,8	715	6,31	6,98	0,67
Каликсо	43,2	730	6,26	6.95	0.69
в среднем	44.3	712	5,80	6,29	0,49
НСР 05			0,160		
среднепоздние					
Ладья	44,2	700	5,65	6,00	0,35
Средняя урожай- ность по опыту	44,2	708	5,73	6,18	0,43
НСР 05			0. 144		

Таблица 3. Расчет достоверной прибавки по урожайности яровой пшеницы, т./га.

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га (+ -)
Контроль	5,73	-
2Химзащита + регулятор роста	6,18	0,43
НСР ₀₅		0,144

Таблица 4. Экономический эффект использования агрохимикатов при возделывании яровой пшеницы

Показатель	Единицы измерения	Контроль (Вар.1)	химзащита + регул. роста (Вар.2)
Урожайность	т/га	5,73	6,18
Рыночная цена зерна за 1 т.	тыс. руб.	15,00	15,00
Стоимость урожая с 1 га	тыс. руб.	85,95	92,70
Издержки (затраты) на 1 га	тыс. руб.	36,071	36,733
Чистый доход на 1 га	тыс. руб.	49,87	55,96
Рентабельность	%	136	152

Результаты исследований по сравнительной оценке эффективности проведения химических мероприятий на агроценозах яровой пшеницы позволили сделать вывод о том, что при внесении пестицидов фирмы «Август» (табл. 4), которые обладают высокой экономической эффективностью, получены следующие результаты:

- на контроле – урожайность зерна ячменя составила 5,73 т/га;
- на варианте 2 – 6,18 т/га при достоверной прибавке зерна (+ 0,43 т/га к контролю);
- чистый доход составил 55,96 тыс. руб./га (+6,09 тыс. руб./га), а рентабельность 152 % (+16 % к варианту 1).

Обсуждение

По мнению ученых ФГБОУ ВО Брянского ГАУ Торигова В.Е., Мельниковой О.В., Сычевой И.В. и др. применение средств химизации при предпосевной обработки семян яровых зерновых (яровая пшеница и др.): фунгицидов и баковых инсекто-фунгицидных смесей для химзащиты защиты изучаемой культуры оказывает влияние на засоренность, фитосанитарное состояние посевов, продуктивность и их биоэкономическую эффективность [10, 11, 12].

При проведении сравнительной оценки эффективности наиболее распространенных химических средств защиты растений разных фирм с целью составления наиболее рациональной системы защиты посевов яровой пшеницы выявлено, что препараты разных фирм показывают разную эффективность. В результате исследования определены наиболее эффективные протравители семян, гербициды, фунгициды, инсектициды, что позволяет составить эффективную комплексную защиту [13, 14, 15].

В наших опытах подтверждены данные исследований ученых других вузов и научных сотрудников института защиты растений, занимающихся внедрением интегрированной защитой растений сельскохозяйственных культур, поскольку достоверная прибавка зерна яровой пшеницы составила + 0,43 т/га к контролю при достаточно высоком уровне рентабельности – 152%.

Заключение

Полная система защиты яровой пшеницы от сорняков, болезней и вредителей болезней с применением препаратов: Байсайд, ВСК 1,5 л/га) + Табу Нео, СК (0,7 л/т); Ракурс, СК (0,4 л/га) + Борей Нео, СК(0,2 л/га) и Балий, КМЭ (0,8 л/га) + Борей Нео, СК(0,2 л/га); Балерина Супер, СЭ (0,5 л/га), + Ластик Экстра, МКЭ (1,0 л/га) + Регги, ВРК (1,0 л/га), МКЭ; Ракурс СК (0,4 л/га); Балий, КМЭ (0,8 л/га); Борей Нео, СК (0,2 л/га); Регги, ВРК (1,0 л/га) в рекомендованной дозировке, в определенные фазы развития культуры гарантированно обеспечивает биологическую эффективную защиту посевов от комплекса неблагоприятных факторов – на 100 %. При этом следует отметить, что по результатам опыта при внесении фунгицидов и инсектицидов (Байсайд, ВСК 1,5 л/га) + Табу Нео, СК (0,7 л/т); Ракурс, СК (0,4 л/га) + Борей Нео, СК(0,2 л/га) и Балий, КМЭ (0,8 л/га) + Борей Нео, СК (0,2 л/га) установлена биологическая эффективность, которая составила на 10 день после обработки – 95 %, а на 20 – 100 %

Применение регулятора роста Регги, ВРК в дозировке 1...1,5 л/га и добавление к нему препарата на основе тринексапак-этила 0,2 л/га на фоне высокой

обеспеченности минеральным питанием привели к снижению высоты растений, предотвращению полегания и повышению урожайности.

Данные, полученные в результате проведения полевых опытов, свидетельствуют о достаточно высоком уровне урожайности яровой пшеницы – 6.18 т/га и рентабельности – 152 %.

Литература

1. Успехи в развитии аграрного сектора экономики Брянской области / С. М. Сычев, С. А. Бельченко, Г. П. Малявко и др. // Вестник Курской ГСХА. 2025. № 1. С. 190-197.
2. Об одобрении прогноза социально-экономического развития Брянской области на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов: распоряжение Правительства Брянской области от 28.10.2024 № 322-рп. - Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/doc/3200202411010002> (дата обращения: 25.12.2025)
3. Современное состояние, тенденции и проблемы производства зерна в Российской Федерации / В. Е. Торигов, В. Ф. Васькин, А. В. Дронов, и др. // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 1(38). С. 15-23.
4. Зотиков В. И., Грядунова Н. В. Научно-технологическое развитие растениеводства на основе взаимодействия науки, технологий и производства // Зернобобовые и крупяные культуры. 2024. №3. 2024, С. 5-11 doi: 10.24412/2309-348X-2024-3-5-11
5. Принципы ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур в условиях Юго-Запада Центрального региона России / О. В. Мельникова, В. Е. Торигов, В. И. Репникова и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2022. № 2 (90). С. 3-8.
6. Современный подход к вопросу защиты пшеницы от болезней и вредителей / А. Ю. Кекало, В. В. Немченко, Н. Ю. Заргарян и др. // Земледелие. 2020. № 5. С. 41-45.
7. Власова Л. М., Попова О. В. Инсектофунгицидные композиции для обработки семян зерновых культур // Защита и карантин растений. 2021. № 8. С. 15-17.
8. Влияние баковой смеси гербицидов на засоренность посевов и продуктивность яровой пшеницы / В. В. Дьяченко, В. М. Никифоров, М. И. Никифоров и др. // Аграрная наука. 2022. № 9. С. 147-150.
9. Тугарева Ф. В. Результаты испытания новых сортов пшеницы твердой яровой в сравнении со стандартом пшеницы мягкой яровой // Зернобобовые и крупяные культуры. 2025. № 2. С. 133-136. doi: 10.24412/2309-348X-2025-2-133-136
10. Биологическая урожайность и качество зерна сортов яровой пшеницы, ячменя, овса и тритикале в условиях юго-запада Центрального региона России / О. В. Мельникова, В. Е. Торигов, М. П. Наумова и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2020. № 5 (81). С. 20-26.
11. От агротехники до высокоэффективных агротехнологий возделывания полевых культур / В. Е.

Ториков, А. Ф. Шустов, О. В. Мельникова и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 5 (105). С. 11-17.

12. Влияние применения средств химизации на фитосанитарное состояние и урожайность зерна яровой пшеницы / В. Е. Ториков, О. В. Мельникова, Е. Н. Вершило и др. // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XX Международная научная конференция, Брянск, 14 марта 2023 года. Брянск: Брянский ГАУ. 2023. С. 225-233.

13. Постовалов А. А., Суханова С. Ф. Эффективность предпосевной обработки семян ярового ячменя фунгицидами // Вестник Новосибирского ГАУ. 2020. № 2 (55). С. 42-49. doi:10.31677/2072-6724-2020-55-2-42-49.

14. Влияние применения средств химизации на фитосанитарное состояние и урожайность зерна яровой пшеницы / В. Е. Ториков, О. В. Мельникова, Е. Н. Вершило и др. // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: Материалы XX международной научной конференции, Брянск, 14 марта 2023 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2023. С. 225-233.

15. Управление продуктивностью посевов зерновых культур при проведении научных исследований и хозяйственной деятельности / В. Е. Ториков, О. В. Мельникова, Н. С. Шпилев и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 5 (99). С. 13-20.

References

1. Successes in the development of the agricultural sector of the Bryansk region's economy / S. M. Sychev, S. A. Belchenko, G. P. Malyavko, et al. // Bulletin of the Kursk Agricultural Academy. 2025. No. 1. P.190-197.

2. On approval of the forecast of socio-economic development of the Bryansk region for 2025 and for the planning period of 2026 and 2027: Decree of the Government of the Bryansk region dated October 28, 2024 No. 322-rp. - Access mode: <http://publication.pravo.gov.ru/doc/3200202411010002>.

3. Current state, trends and problems of grain production in the Russian Federation / V. E. Torikov, V. F. Vaskin, A. V. Dronov, et al. // Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2022. No. 1(38). P.15-23.

4. Zotikov V. I., Gryadunova N.V. Scientific and technological development of crop production based on the interaction of science, technology and production//Legumes and Cereals" No. 3, 2024, P. 5-11 doi: 10.24412/2309-348X-2024-3-5-11

5. Principles of Resource-Saving Technologies for Cultivating Grain Crops in the South-West of the Central Region of Russia / O.V. Melnikova, V.E. Torikov, V.I. Repnikova, et al. // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2022. No. 2 (90). P. 3-8.

6. A Modern Approach to Protecting Wheat from Diseases and Pests / A.Yu. Kekalo, V.V. Nemchenko, N.Yu. Zargaryan, et al. // Agriculture. 2020. No. 5. P. 41-45.

7. Vlasova L. M., Popova O. V. Insectofungicidal compositions for the treatment of grain seeds // Plant protection and quarantine. 2021. No. 8. P. 15-17.

8. Influence of tank mixture of herbicides on crop contamination and productivity of spring crops wheat / V.V. Dyachenko, V.M. Nikiforov, M.I. Nikiforov and others // Agrarian Science. 2022. No. 9. P.147-150.

9. Tugareva F.V. Results of testing new varieties of spring durum wheat in comparison with the soft spring wheat standard // Grain legumes and cereal crops. 2025. No. 2. Pp. 133-136. doi: 10.24412/2309-348X-2025-2-133-13610. Biological yield and grain quality of spring wheat, barley, oats and triticale varieties in the south-west of the Central region of Russia / O.V. Melnikova, V.E. Torikov, M.P. Naumova, et al. // Bulletin of the Bryansk Agricultural Academy. 2020. № 5 (81). P. 20-26.

11. From agricultural technology to highly effective agricultural technologies for cultivating field crops / V.E. Torikov, A.F. Shustov, O.V. Melnikova, et al. // Bulletin of the Bryansk Agricultural Academy. 2024. No. 5 (105). P.11-17.

12. The influence of the use of chemical agents on the phytosanitary condition and yield of spring wheat grain / V. E. Torikov, O. V. Melnikova, E. N. Vershilo, et al. // Agroecological aspects of sustainable development of the agroindustrial complex: proceedings of the XX International Scientific Conference, Bryansk, March 14, 2023. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2023. P. 225-233.

13. Postovalov A.A., Sukhanova S.F. The Effectiveness of Pre-Sowing Treatment of Spring Barley Seeds with Fungicides // Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University. 2020. No. 2 (55). P. 42-49. Access mode: doi:10.31677/2072-6724-2020-55-2-42-49.

14. The impact of the use of chemical agents on the phytosanitary condition and grain yield of spring wheat / V. E. Torikov, O. V. Melnikova, E. N. Vershilo, and V. I. Repnikova // Agroecological Aspects of Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the XX International Scientific Conference, Bryansk, March 14, 2023. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2023. P. 225-233.

15. Productivity management of grain crops during scientific research and economic activity / V. E. Torikov, O. V. Melnikova, N. S. Shpilev, et al. // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2023. № 5 (99). P. 13-20.

Влияние экзогенных аминокислот и минеральных удобрений на фитометрические показатели озимой пшеницы

В. А. Исайчев, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Почвоведение, химия, биология, технологии переработки продукции растениеводства»

Н. Н. Андреев[✉], кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Почвоведение, химия, биология, технологии переработки продукции растениеводства»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, зд. 1

[✉]andreev919@yandex.ru

Резюме. Исследования проведены с целью изучения влияния экзогенных аминокислот на фотосинтетические процессы в растениях озимой пшеницы сорта Саратовская 17. Исследования проводили в полевых и лабораторных условиях, где изучено действие отдельных свободных аминокислот на неудобренном и удобренном фоне на параметры фотосинтетической активности растений опытной культуры. Площадь листовой поверхности растений на неудобренном фоне увеличивалась на 0,1...6,9 тыс. м²/га, при использовании удобрений на 0,8...7,9 тыс. м²/га. Фотосинтетический потенциал (ФП) за вегетационный период был максимальным при обработке семян глутаминовой кислотой и составил 5785,2 тыс. м²/га в сутки, что превышает контроль на 1049,3 тыс. м²/га в сутки. Наибольшие величины чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ) отмечены в период трубкования – колошения. При использовании комплексных минеральных удобрений значения ЧПФ выше, чем на аналогичных вариантах на неудобренном фоне. Накопление сухого вещества было максимальным в варианте с использованием глутаминовой кислоты на минеральном фоне. Прибавка к контролю составила: в фазу кущения – 2,40 т/га, в период выхода в трубку – 2,14 т/га, в фазу колошения – 2,26 т/га, в фазу молочной спелости – 4,5 т/га. Проведенные исследования доказывают эффективность практического применения экзогенных аминокислот в технологии возделывания озимой пшеницы за счет активизации формирования показателей фотосинтеза.

Ключевые слова: аминокислоты, озимая пшеница, минеральные удобрения, фотосинтез, продуктивность.

Для цитирования: Исайчев В. А., Андреев Н. Н. Влияние экзогенных аминокислот и минеральных удобрений на фитометрические показатели озимой пшеницы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 56-63. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-56-63

The effect of exogenous amino acids and mineral fertilizers on winter wheat phytometric parameters

V. A. Isaichev, N. N. Andreev[✉]

Ulyanovsk State Agricultural University

432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, Building 1

[✉]andreev919@yandex.ru

Abstract. The study aimed to investigate the effect of exogenous amino acids on photosynthetic processes in the Saratovskaya 17 winter wheat variety. The study was conducted in the field and laboratory conditions, examining the effects of individual free amino acids on photosynthetic activity parameters in the experimental crop, both under unfertilized and fertilized conditions. Leaf area increased by 0.1–6.9 thousand m²/ha under unfertilized conditions, while with fertilizers, it increased by 0.8–7.9 thousand m²/ha. The photosynthetic potential (PP) during the growing season was highest when seeds were treated with glutamic acid and amounted to 5785.2 thousand m²/ha per day, which exceeds the control by 1049.3 thousand m²/ha per day. The highest values of net photosynthetic productivity (NPP) were noted during the booting - heading period. With the use of complex mineral fertilizers, NPP values are higher than in similar variants on an unfertilized background. Dry matter accumulation was highest in the variant using glutamic acid on a mineral background. The increase compared to the control was: at the tillering stage - 2.40 t / ha, during booting - 2.14 t / ha, at the heading stage - 2.26 t / ha, at the milky ripeness stage - 4.5 t / ha. The conducted studies demonstrate the effectiveness of the practical use of exogenous amino acids in winter wheat cultivation technology by activating the formation of photosynthesis indicators.

Keywords: amino acids, winter wheat, mineral fertilizers, photosynthesis, productivity.

For citation: Isaichev V. A., Andreev N. N. The effect of exogenous amino acids and mineral fertilizers on winter wheat phytometric parameters // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 56-63 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-56-63

Введение

Применение экзогенных аминокислот в агротехнологиях открывает новые перспективы и может

включать разработку новых форм их использования, которые специально адаптированы к различным климатическим условиям и агрономическим системам.

Несмотря на некоторые ограничения, правильно подобранный подход к использованию аминокислот может значительно улучшить эффективность агротехнологий, повысить урожайность и улучшить качество продукции сельскохозяйственных культур [1].

Использование аминокислот в растениеводстве предлагает множество возможностей для улучшения устойчивости и повышения продуктивности растений, оптимизации минерального питания и улучшения состояния почвы. Это подчеркивает их важность как ключевого компонента в современных устойчивых технологиях, применяемых в растениеводстве [2].

Применение экзогенных аминокислот в сельском хозяйстве направлено на стимуляцию роста растений посредством интенсификации синтеза белков, активирования антиоксидантных систем, улучшения усвоения питательных веществ, улучшения водного обмена. Кроме того, аминокислоты могут влиять на выработку фитогормонов, которые регулируют рост и развитие растений. Обработка семян или внекорневые подкормки аминокислотами могут значительно улучшить всхожесть семян, ускорить рост и увеличить сопротивляемость растений к болезням [3, 4].

На практике экзогенные аминокислоты применяют под различные культуры, от зерновых до овощных.

Преимущества практического использования аминокислот:

повышение устойчивости растений к абиотическим стрессам, таким как засуха, засоленность почвы и экстремальные температуры. Они способствуют аккумуляции осмопротекторов, таких как пролин, который помогает растениям поддерживать водный баланс и защищает клеточные структуры от повреждения при засухе. Также аминокислоты уменьшают оксидативный стресс, вызванный неблагоприятными условиями окружающей среды;

аминокислоты стимулируют рост полезных почвенных микроорганизмов, которые участвуют в биодеградации органического материала и циклировании питательных веществ. Это способствует более эффективному использованию растениями доступных в почве ресурсов, улучшению корневого роста и общего здоровья растений и, что важно, позволяет сокращать количество вносимых удобрений;

аминокислоты способны индуцировать синтез фитоалексинов – естественных веществ, которые растения производят в ответ на различные инфекции, что позволяет снижать объемы использования средств защиты растений;

аминокислоты улучшают усвоение растениями макро- и микроэлементов за счет хелатирования металлов и улучшения их транспорта и мобилизации внутри растения, что особенно важно для таких элементов как железо, марганец и цинк;

аминокислоты могут служить альтернативой синтетическим стимуляторам роста, предлагая натуральное и безопасное решение для повышения

эффективности сельскохозяйственного производства [5, 6, 7, 8].

Цель исследования – изучение применения экзогенных аминокислот и комплексных минеральных удобрений в технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Среднего Поволжья.

Задачи исследования – определить наиболее эффективные сочетания экзогенных аминокислот с используемыми комплексными минеральными удобрениями и установить их влияние на интенсивность процесса и продуктивность фотосинтеза озимой пшеницы.

Материалы и методы

Исследования были проведены в 2021-2023 гг. на опытном поле и в лабораториях Ульяновского ГАУ с озимой пшеницей сорта Саратовская 17. Объекты исследования – экзогенные аминокислоты: аргинин, глутаминовая кислота, фенилаланин и метионин. Полевой опыт проводили на делянках площадью 20 м², применяли метод систематического расположения делянок при четырехкратной повторности. Почва опытного поля – чернозем выщелоченный среднесуглинистый.

При закладке полевого опыта применялись общепринятые методики. Семена опытной культуры за день до посева обрабатывали водным раствором исследуемых аминокислот в концентрации 10⁻⁶ моль/л. В опыте кроме естественного, присутствовал удобрительный фон: основное удобрение – диаммофоска в дозе 300 кг/га, подкормка (фазы кущения (весна) и трубкования) – аммиачная селитра в дозе по 100 кг/га, внекорневая подкормка (в фазу колошения) – 10 %- ным раствором мочевины.

Анализы, учеты и наблюдения в эксперименте проводили в соответствии с общепринятыми методиками и ГОСТами. Полевые и лабораторные опыты сопровождали соответствующими наблюдениями, учетом и анализами. Фенологические наблюдения проводили в соответствии с методикой государственного сортоиспытания. Ассимиляционную поверхность листьев рассчитывали по Н.Н. Третьякову, А.С. Лосевой (1990). Фотосинтетическую деятельность растений определяли по методике А.А. Ничипоровича (1961).

Полученные результаты исследований были подвержены математико-статистической обработке методом корреляционно-регрессионного анализа на ПК с использованием Excel 2016.

Результаты

Площадь листовой ассимилирующей поверхности считается решающим фактором при формировании продуктивности фотосинтеза отдельного растения, а, следовательно, и продуктивности всего ценоза. Формирование ассимиляционной поверхности листьев прямо пропорционально количеству листьев и их линейным параметрам. Эти показатели непрерывно меняются в процессе роста и развития растений и зависят от условий возделывания.

Для большей продуктивности и формирования урожая хорошего качества площадь листьев должна

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

быть оптимальной как по размерам, так и по фазам роста и развития сельскохозяйственных культур.

В проведенных исследованиях показатель площади листовой поверхности растений озимой пшеницы сорта Саратовская 17 увеличивается во всех вариантах опыта, по сравнению с контролем как на удобренном, так и на неудобренном фоне. Так, на естественном фоне прибавка к контролю в зависимости от варианта и фаз роста и развития составила от 0,1 до 6,9 тыс. м²/га. При использовании удобрений данный показатель увеличивался к контролю на 0,8...7,9 тыс. м²/га. Максимальные значения площади листовой поверхности наблюдались в варианте с

применением глутаминовой кислоты, причем как на естественном, так и на удобренном фоне питания (табл. 1).

Влияние опытных препаратов на формирование площади листьев наблюдается в течение всего онтогенеза растений. Дополнительно на величину листовой поверхности оказывает влияние число взшедших растений. При этом следует отметить, что в годы исследований начальные периоды развития растений проходили в неблагоприятных погодных условиях – недостатка влаги, что характерно для лесостепи Среднего Поволжья.

Таблица 1. Динамика площади листовой поверхности растений озимой пшеницы сорта Саратовская 17, тыс. м²/га, среднее за 2021 – 2023 гг.

Вариант	Фаза роста и развития			
	Кущение	Выход в трубку	Колошение	Молочная спелость
Неудобренный фон				
Контроль	9,08	23,7	40,8	11,7
Аргинин	10,7	26,1	44,5	14,0
Глутаминовая кислота	12,7	27,7	47,3	18,6
Метионин	11,7	26,3	46,7	17,4
Фенилаланин	10,2	25,6	40,9	13,8
Удобренный фон				
Контроль	14,2	27,3	49,3	13,5
Аргинин	15,3	30,1	51,9	16,2
Глутаминовая кислота	17,9	31,9	53,7	21,4
Метионин	16,5	30,3	52,4	20,1
Фенилаланин	15,1	29,5	50,1	15,9

Величина урожайности является результатом фотосинтетической деятельности растений непосредственно за весь период онтогенеза, но логичнее ориентироваться на интегральный показатель работы ассимиляционного аппарата – фотосинтетический потенциал (ФП). Фотосинтетический потенциал листьев – это показатель, характеризующийся суммой ежедневных показателей ассимилирующей площади листьев в посеве за весь вегетационный период или какие-то его части.

В наших опытах мы изучали влияние, оказываемое предпосевной обработкой опытными

препаратами семян озимой пшеницы на фотосинтетический потенциал вегетирующих растений (табл. 2).

Наибольший фотосинтетический потенциал (ФП) получен при обработке семян глутаминовой кислотой и на удобренном, и на неудобренном фонах. В целом за весь вегетационный период максимальное значение фотосинтетического потенциала получено на удобренном фоне. Оно составило 5785,2 тыс. м²/га в сутки, что превышает контроль на 1049,3 тыс. м²/га. ФП в вариантах с обработкой семян другими аминокислотами также превышал контроль во все фазы роста и развития.

Таблица 2. Фотосинтетический потенциал листьев озимой пшеницы сорта Саратовская 17, тыс. м²/га в сутки, среднее за 2021-2023 гг.

Вариант	Фенологическая фаза			Молочная спелость	Σ ФП
	Кущение	Выход в трубку	Колошение		
Неудобренный фон					
Контроль	217,9	711,6	2589,6	877,5	4396,1
Аргинин	254,8	783,2	2318,4	1050,1	4501,8
Глутаминовая кис- лота	304,8	831,5	2459,6	1395,5	4990,4
Метионин	280,8	789,2	2424,4	1305,3	4693,2
Фенилаланин	246,8	768,3	2080,5	1035,8	4139,8
Удобренный фон					
Контроль	340,8	819,2	2563,6	1012,5	4735,9
Аргинин	367,2	903,3	2650,8	1215,2	5242,0
Глутаминовая кис- лота	429,6	958,2	2792,4	1605,0	5785,2
Метионин	396,4	909,4	2772,8	1507,5	5479,3
Фенилаланин	362,4	885,1	2605,2	1192,5	5045,1

Масса накапливаемого растением сухого вещества в течение вегетации является отражением совокупности процессов фотосинтеза, дыхания, углеводно-белкового обмена и интенсивности роста растения. Интенсивность прироста сухого вещества определяется совокупным воздействием основных абиотических факторов окружающей среды (влагодобеспеченности, температуры). По мере улучшения водного и питательного режимов идет более интенсивное накопление сухого вещества растением.

Нарастание биомассы растения озимой пшеницы происходит с начала развития и продолжается до конца созревания (табл. 3).

Интенсивность процесса накопления биомассы различна по фенологическим фазам: наибольшая интенсивность накопления биомассы отмечена в период, связанный с интенсивным ростом (кущение – трубкование).

Таблица 3. Динамика накопления сухой массы в растениях озимой пшеницы сорта Саратовская 17, т/га, среднее за 2021-2023 гг.

Вариант	Фенологическая фаза			Молочная спелость
	Кущение	Выход в трубку	Колошение	
Неудобренный фон				
Контроль	2,05	5,75	8,10	9,20
Аргинин	3,78	5,78	9,56	10,13
Глутаминовая кислота	4,13	6,05	10,26	10,52
Метионин	3,91	5,91	9,81	9,62
Фенилаланин	2,43	5,80	8,86	9,71
Удобренный фон				
Контроль	2,37	7,37	10,75	11,51
Аргинин	4,51	6,77	11,55	13,11
Глутаминовая кислота	4,77	9,51	13,01	16,01
Метионин	3,94	8,94	11,88	13,77
Фенилаланин	3,53	7,53	11,06	12,12

Различия в биомассе по вариантам начинают проявляться уже с фазы всходов. Прослеживается тенденция повышенного накопления биомассы растения на удобренном фоне. Применение экзогенных аминокислот способствует интенсификации процессов накопления биомассы растениями озимой пшеницы, особенно на ранних стадиях развития.

В среднем за годы исследований накопление сухого вещества было максимальным в варианте с применением глутаминовой кислоты на минеральном фоне. Прибавка к контролю составила: в фазу кущения – 2,40 т/га, в период выхода в трубку – 2,14 т/га, в фазу колошения – 2,26 т/га, в фазу молочной спелости – 4,5 т/га (табл. 3).

Одним из показателей, характеризующим продукционный процесс растений, является чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ). Этот показатель часто используется в научных исследованиях при определении фотосинтетической активности посевов. Чистая продуктивность фотосинтеза – это количество сухого вещества в граммах, накопленного 1 м² листовой поверхности за сутки. Рост и фотосинтез составляют основу продукционного процесса растений. Показатель чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ) отражает накопление массы растением в пересчете на единицу листовой поверхности за определенный период.

Таблица 4. Чистая продуктивность фотосинтеза озимой пшеницы сорта Саратовская 17, г/м² в сутки, среднее за 2021-2023 гг.

Вариант	Кущение – выход в трубку	Выход в трубку – колошение	Колошение – молочная спелость
Неудобренный фон			
Контроль	8,50	11,82	10,19
Аргинин	9,41	12,65	11,32
Глутаминовая кислота	9,83	13,38	12,18
Метионин	9,60	13,23	11,15
Фенилаланин	9,43	13,10	11,00
Удобренный фон			
Контроль	9,90	14,33	12,46
Аргинин	10,00	14,40	12,55
Глутаминовая кислота	10,25	14,97	12,96
Метионин	9,98	14,51	12,50
Фенилаланин	9,92	14,39	12,60

Продуктивность фотосинтеза в опыте имела восходящий характер на обоих фонах выращивания (табл. 4). Наибольшие величины отмечены в период

трубкование – колошение. При использовании комплексных минеральных удобрений значения ЧПФ

выше, чем на аналогичных вариантах на неудобренном фоне.

Наилучший результат наблюдается в варианте с применением глутаминовой кислоты совместно с минеральными удобрениями и составляет 10,25 г/м² в сутки в период кущения – выхода в трубку, 14,97 г/м² в сутки в период выход в трубку – колошение, 12,96 г/м² в сутки в период колошение – молочная спелость (табл. 4).

Определялось влияние площади листовой поверхности растений, фотосинтетического потенциала листьев и накопления сухой массы на чистую продуктивность фотосинтеза растений озимой пшеницы сорта Саратовская 17 по данным за 2021-2023 гг. с помощью корреляционно-регрессионного анализа, который дает возможность оценить количественное влияние факторов на результат.

Количественно связь между чистой продуктивностью фотосинтеза растений и факторными признаками выражается следующим уравнением регрессии:

$$Y = 7,202 + 0,491X_1 - 0,005X_2 + 0,082X_3,$$

где Y – чистая продуктивность фотосинтеза растений, г/м²;

X_1 – площадь листовой поверхности растений, тыс. м²/га;

X_2 – фотосинтетический потенциал листьев, тыс. м²/га;

X_3 – накопление сухой массы растений, т/га.

Данные факторы имеют тесную зависимость с результативным признаком (множественный коэффициент корреляции $R=0,98$) и определяют 95,8 % его различий.

Связь результативного признака, отражающего чистую продуктивность фотосинтеза растений озимой пшеницы, с площадью листовой поверхности растений и накоплением сухой массы прямая. Фотосинтетический потенциал листьев имеет слабую обратную связь с результативным признаком.

Для обоснования выбора факторов при включении их в модель были рассчитаны коэффициенты парной корреляции между всеми показателями, взятыми для анализа. Полученные коэффициенты парной корреляции свидетельствуют о том, что между чистой продуктивностью фотосинтеза растений озимой пшеницы сорта Саратовская 17 и изучаемыми факторами существует достаточно тесная связь. В наиболее тесной связи с результативным признаком – площадь листовой поверхности растений (X_1).

Расчетное значение критерия Фишера выше теоретического ($F_{\text{факт.}} = 45,274$ при $F_{\text{табл.}} = 2,87$), что свидетельствует о достоверности полученного уравнения регрессии. Превышение значения фактического показателя над табличным говорит о высокой надежности полученных результатов, а полученная модель регрессии может быть использована для оценки влияния учтенных в модели факторов на чистую продуктивность фотосинтеза растений.

Увеличение площади листовой поверхности растений приводит к уменьшению чистой продуктивности фотосинтеза. Это связано с тем, что большая листовая поверхность из-за взаимного затенения снижает интенсивность фотосинтеза вследствие ухудшения освещенности нижних листьев, перераспределения питательных веществ, нарушения светового режима, в результате чего увеличивается непродуктивная часть урожая и уменьшается продуктивная.

Полученные за годы исследований данные показывают, что действие экзогенных аминокислот на изменение фотосинтетической деятельности растений проявляется в повышении интенсификации роста и продолжительности жизни растения, а также интенсивности накопления биомассы на единицу листовой поверхности. Данный факт может рассматриваться как основа адаптации растений озимой пшеницы и дает возможность формирования и сохранения количественных и качественных характеристик репродуктивных органов растений при неблагоприятных климатических условиях [9].

Обсуждение

Для активизации фотосинтетической деятельности сельскохозяйственных растений необходимо использовать различные физиологически активные вещества, которые дают возможность создавать посе́вы, поглощающие наибольшее количество энергии фотосинтетически активной части солнечной радиации. При этом коэффициент использования её в фотосинтезе и образовании общей и хозяйственной урожайности должен быть максимальным. Получение высоких урожаев требует не только строгого соблюдения технологии возделывания сельскохозяйственных культур, но и применения перспективных и научно-обоснованных подходов к использованию различных факторов регуляции роста и развития растений [10, 11].

Урожайность сельскохозяйственных культур формируется в процессе фотосинтеза, когда в вегетирующих растениях образуется органика, и солнечная энергия переходит в энергию растительной биомассы. Производительность этого процесса зависит от функционирования вегетирующих растений как «фотосинтезирующей системы» [12, 13]. Управлять этим процессом весьма сложно, и одним из способов регулирования является использование физиологически активных веществ – регуляторов роста и развития растений. К таким веществам относятся и аминокислоты, используемые в наших исследованиях [14, 15, 16].

В исследованиях Т. Ю. Вознесенской с соавторами установлено, что продуктивность листовой поверхности в течение всей вегетации достигала максимальных значений при обработке семян и некорневых подкормках комплексом аминокислот с микроэлементами на высоком (NPK) фоне минеральных удобрений. При применении комплексов в течение вегетации озимой пшеницы сорта Вершина возрастает фотосинтетический потенциал

растений за счет увеличения площади листовой поверхности [17].

В работе Веревкиной Т. М с соавторами представлены результаты исследований о влиянии различных комплексов микроудобрений и аминокислот на формирование фотосинтетического аппарата озимой пшеницы. Они показали, что обработка семян и проведение двух подкормок комплексом хелатов микроэлементов, комплексом аминокислот с микроэлементами и комплексом аминокислот способствовали дальнейшему повышению содержания хлорофилла в растениях озимой пшеницы, при подкормке как одной, так и двойной дозами и колебалось от 5,47 до 5,70 мг/г сырого вещества. Предпосевная обработка семян способствовала увеличению фотосинтетической деятельности растений в посевах и улучшению динамики ростовых процессов [18].

Можаровой И.П. представлены результаты полевых испытаний новых полифункциональных удобрений с включением гуминовых веществ, аминокислот, макро- и микроэлементов на пшенице яровой и озимой. Применение этих удобрений для внесения в почву под предпосевную культивацию или в подкормку в период вегетации способствует активизации ростовых и формообразовательных процессов, повышению устойчивости растений к негативным факторам среды и к болезням, повышению урожайности и улучшению качества зерна. В условиях Тамбовской области прибавка урожая зерна озимой пшеницы сорта Виола составила 5,8...26,0 %. В условиях Ульяновской области прибавка урожая зерна яровой пшеницы сорта Симбирцит составила 8,7...15,1 %. Урожайность пшеницы яровой сорта Арка в условиях Курганской области повысилась на 6 %. В Рязанской области прибавка урожая яровой пшеницы сорта Дарья составила 8,2... 29,2 % [19].

В исследованиях Шаповал О.А. и соавторов показано, что применение новых форм полифункциональных удобрений с включением аминокислот для некорневых подкормок посевов пшеницы яровой в разных почвенно-климатических условиях способствовало повышению урожайности и качества зерна. Прибавка урожая колебалась от 31,5 до 52,5 % – в Московской области, от 8,7 до 15, % в Ульяновской области и от 2,4 до 9,6 % - в Курганской области [20].

Наши исследования позволили выявить преимущества применения аминокислот наряду с традиционными макро- и микроудобрениями в технологии возделывания озимой пшеницы. Считаем, что их применение является эффективным способом решения проблем повышения стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур, которые остро стоят в лесостепи Среднего Поволжья – зоне рискованного земледелия.

Заключение

Полученные в результате опытов данные подтверждают практическую значимость использования

экзогенных аминокислот и комплексных минеральных удобрений в агротехнологии озимой пшеницы. Аминокислоты способствуют увеличению активности фотосинтетических процессов в растениях, создавая условия роста продуктивности и улучшения качества конечной продукции полевых культур. Применение аминокислот увеличивало показатель площади листовой поверхности растений. Максимальные значения площади листовой поверхности наблюдали в варианте с применением глутаминовой кислоты, причем как на естественном, так и на удобренном фоне питания. Наибольший фотосинтетический потенциал (ФП) также получен при обработке семян глутаминовой кислотой. В целом за весь вегетационный период на удобренном фоне максимальное значение фотосинтетического потенциала составило 5785,2 тыс. м²/га в сутки, что превышает контроль на 1049,3 тыс. м²/га. Продуктивность фотосинтеза имела восходящий характер на обоих фонах выращивания. Наилучший результат наблюдается в варианте с применением глутаминовой кислоты совместно с минеральными удобрениями, значение которого составило 10,25 г/м² в сутки в период кущение – выход в трубку, 14,97 г/м² в сутки в период выход в трубку – колошение, 12,96 г/м² в сутки в период колошение – молочная спелость. Накопление сухого вещества было максимальным в варианте с применением глутаминовой кислоты на минеральном фоне и составило 4,77...16,01 т/га.

По результатам исследований можно рекомендовать сельскохозяйственным товаропроизводителям применять предпосевную обработку семян озимой пшеницы экзогенными аминокислотами для интенсификации фотосинтетических процессов и повышения продуктивности растений. Повысить эффективность предпосевной обработки можно при использовании совместно с комплексными минеральными удобрениями.

Литература

1. Исайчев В. А., Андреев Н. Н., Федорова И. Л. Влияние свободных аминокислот и минеральных удобрений на продуктивность озимой пшеницы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 1 (69). С. 71-78. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-71-78
2. Применение аминокислот и их хелатных комплексов с микроэлементами в питании растений / Д. В. Петухов, Е. С. Измистьев, А. В. Сазанов и др. // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 167-174. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-167-174
3. Применение аминокислот как стимуляторов роста в агротехнологиях / А. А. Кунцевич, А. В. Ручкина, Р.Н. Ушаков и др. // Сетевой научный журнал РГАУ, 2025. №3(9). С. 24-31/ doi:10.36508/journal.2025.79.25.004
4. Федулов Ю. П., Лищенковский М. Ю., Подушин Ю. В. Влияние аминокислот на растения озимой пшеницы // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 58. С. 171-179.

5. Amino Acids in Plants: Regulation and Functions in Development and Stress Defense / M. Trovato, D. Funck, G. Forlani, et al. // *Front. Plant Sci.* 2021. Vol. 12. P. 772810. doi: 10.3389/fpls.2021.772810

6. Baqir H. A., Al-Naqeeb M. A. S. Effect of some amino acids on tillering and yield of three bread wheat cultivars // *Iraqi J. Agric. Sci.* 2019. Vol. 50. P. 20-30.

7. El-Said M. A. A., Mahdy A.Y. Response of Two Wheat Cultivars to Foliar Application with Amino Acids under Low Levels of Nitrogen Fertilization // *Middle East Journal of Agriculture Research.* 2016. Vol. 05. P.462-472.

8. Мухина М. Т., Можарова И. П., Коршунов А. А. Эффективность применения удобрений на основе комплекса хелатов микроэлементов и аминокислот на озимой пшенице в Нижегородской области // *Плодородие.* 2020. № 6. С. 14-17. doi:10.25680/S19948603.2020.117.04

9. Формирование продуктивности зерновых культур при применении минеральных удобрений и регуляторов роста в условиях Среднего Поволжья: монография / В. А. Исайчев, Н. Н. Андреев, Е. В. Провалова и др. Ульяновск: Ульяновский ГАУ, 2023. 258 с. ISBN 978-5-6051071-1-8

10. Котляров Д. В., Котляров В. В., Федулов Ю. П. Регуляция ростовых процессов растений пшеницы путем использования экзогенных аминокислот // *Труды Кубанского государственного аграрного университета.* 2017. № 69. С. 146-151. doi: 10.21515/1999-1703-69-146-151

11. Федулов Ю. П., Лищенко М. Ю., Мальцева Д. А. Влияние экзогенных аминокислот на растения озимой пшеницы сорта Адель // *Молодой ученый.* 2015. № 9-2. С. 80-81.

12. Неверов А. А. Влияние внекорневых обработок регуляторами роста и экологических условий на качество продукции ячменя // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии.* 2025. №1 (69). С. 11-18. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-11-18

13. Щербакова А. С., Богомазова С. В. Эффективность применения микроэлементных удобрений и регуляторов роста на озимой пшенице в лесостепном Поволжье // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии.* 2025. №2 (70). С. 57-65. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-57-65

14. Влияние некорневой подкормки хелатами микроэлементов на урожайность яровой пшеницы при возделывании на лугово – черноземной почве / В. В. Попова, Н. В. Гоман, И. А. Бобренко и др. // *Вестник Красноярского ГАУ.* 2020. № 8. С. 57-64. doi: 10.36718/1819-4036-2020-8-57-64

15. Пономарева А. С., Коршунов А. А., Вознесенская Т. Ю. Продуктивность и качество пшеницы при внесении органоминеральных удобрений с комплексом аминокислот // *Плодородие.* 2019. № 5. С. 13-16. doi:10.25680/S19948603.2019.110.04

16. Применение ростостимуляторов при возделывании яровой мягкой пшеницы / Н. А. Воронкова,

Н.Ф. Балабанова, В. А. Волкова и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2020. Т. 34. № 10. С. 73-77. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11011

17. Вознесенская Т. Ю., Можарова И. П. Влияние инновационных удобрительных комплексов на фотосинтез и продуктивность листового аппарата пшеницы озимой // *Плодородие.* 2021. №6. С. 52-55. doi: 10.25680/S19948603.2021.123.14.

18. Вознесенская Т. Ю., Вережкина Т. М. Влияние инновационных форм удобрений на нарастание листового аппарата и его фотосинтетическую деятельность // *Плодородие.* 2018. №6. С. 9-12. doi: 10.25680/S19948603.2018.105.03

19. Можарова И. П., Коршунов А. А., Вознесенская Т. Ю. Влияние полифункциональных удобрений с включением гуминовых веществ, аминокислот, макро – и микроэлементов на урожайность и качество озимой пшеницы // *Агрохимический вестник.* 2018. № 6. С. 39-43. doi: 10.24411/0235-2516-2018-10058

20. Шаповал О. А., Можарова И. П., Пономарева А. С. Эффективность полифункциональных удобрений с включением аминокислот на зерновых культурах // *Плодородие.* 2018. № 5. С. 26-29. doi: 10.25680/S19948603.2018.104.08

References

1. Isaichev V. A., Andreev N. N., Fedorova I. L. Effect of free amino acids and mineral fertilizers on winter wheat productivity // *Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy.* 2025. No. 1 (69). P.71-78. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-71-78

2. Use of amino acids and their chelate complexes with microelements in plant nutrition / D. V. Petukhov, E. S. Izmetiev, A. V. Sazanov, et al. // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 1. P.167-174. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-167-174

3. The use of amino acids as growth stimulants in agricultural technologies / A. A. Kuntsevich, A. V. Ruchkina, R. N. Ushakov, et al. // *Online scientific journal of RSATU,* 2025. No. 3 (9). P.24-31 / doi: 10.36508/journal.2025.79.25.004

4. Fedolov Yu. P., Lishchenovsky M. Yu., Podushin Yu. V. The effect of amino acids on winter wheat plants // *Transactions of the Kuban State Agrarian University.* 2016. No. 58. P.171-179.

5. Amino Acids in Plants: Regulation and Functions in Development and Stress Defense / M. Trovato, D. Funck, G. Forlani, et al. // *Front. Plant Sci.* 2021. Vol. 12. P. 772810. doi: 10.3389/fpls.2021.772810

6. Baqir H. A., Al-Naqeeb M. A. S. Effect of some amino acids on tillering and yield of three bread wheat cultivars // *Iraqi J. Agric. Sci.* 2019. Vol. 50. P. 20-30.

7. El-Said M. A. A., Mahdy A. Y. Response of Two Wheat Cultivars to Foliar Application with Amino Acids under Low Levels of Nitrogen Fertilization // *Middle East Journal of Agricultural Research.* 2016. Vol. 05. R.462-472.

8. Mukhina M. T., Mozharova I. P., Korshunov A. A. Efficiency of applying fertilizers based on a complex of

microelement and amino acid chelates on winter wheat in the Nizhny Novgorod region // Soil Fertility. 2020. No. 6. P.14-17. doi:10.25680/S19948603.2020.117.04

9. Formation of productivity of grain crops with the use of mineral fertilizers and growth regulators in the conditions of the Middle Volga region: monograph / V. A. Isaichev, N. N. Andreev, E. V. Provalova, et al. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agrarian University, 2023. 258 p. ISBN 978-5-6051071-1-8

10. Kotlyarov D. V., Kotlyarov V. V., Fedolov Yu. P. Regulation of growth processes in wheat plants by using exogenous amino acids // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. 2017. No. 69. P.146-151. doi: 10.21515/1999-1703-69-146-151

11. Fedolov Yu. P., Lishchenovsky M. Yu., Maltseva D. A. Influence of exogenous amino acids on winter wheat plants of Adel variety // Young scientist. 2015. No. 9-2. P.80-81.

12. Neverov A. A. Effect of foliar treatment with growth regulators and environmental conditions on the quality of barley products // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 1 (69). P. 11-18. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-11-18

13. Shcherbakova A. S., Bogomozova S. V. Efficiency of using microelement fertilizers and growth regulators on winter wheat in the forest-steppe Volga region // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 2 (70). P. 57-65. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-57-65

14. The effect of foliar feeding with microelement chelates on the yield of spring wheat when cultivated on meadow-black soil / V. V. Popova, N. V. Goman, I. A. Bobrenko, et al. // Vestnik of the Krasnoyarsk State

Agrarian University. 2020. No. 8. P.57-64. doi: 10.36718/1819-4036-2020-8-57-64

15. Ponomareva A. S., Korshunov A. A., Voznesenskaya T. Yu. Productivity and quality of wheat when applying organomineral fertilizers with a complex of amino acids // Soil Fertility. 2019. No. 5. P.13-16. doi:10.25680/S19948603.2019.110.04

16. Application of growth stimulants in cultivation of spring soft wheat / N. A. Voronkova, N. F. Balabanova, V. A. Volkova, et al. // Achievements of science and technology in the agro-industrial complex. 2020. Vol. 34. No. 10. P.73-77. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11011

17. Voznesenskaya T. Yu., Mozharova I. P. Influence of innovative fertilizer complexes on photosynthesis and leaf apparatus productivity of winter wheat // Soil Fertility. 2021. No. 6. P.52-55. doi: 10.25680/S19948603.2021.123.14.

18. Voznesenskaya T. Yu., Verevkina T. M. Effect of innovative forms of fertilizers on the growth of the leaf apparatus and its photosynthetic activity // Soil Fertility. 2018. No. 6. P.9-12. doi: 10.25680/S19948603.2018.105.03

19. Mozharova I. P., Korshunov A. A., Voznesenskaya T. Yu. Effect of multifunctional fertilizers with the inclusion of humic substances, amino acids, macro - and microelements on the yield and quality of winter wheat // Agrochemical Vestnik. 2018. No. 6. P.39-43. doi: 10.24411/0235-2516-2018-10058

20. Shapoval O. A., Mozharova I. P., Ponomareva A. S. Efficiency of polyfunctional fertilizers with amino acids on grain crops // Soil Fertility. 2018. No. 5. P.26-29. doi: 10.25680/S19948603.2018.104.08

Влияние технологий возделывания на свойства чернозема выщелоченного и урожайность ячменя

А. Х. Куликова¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Почвоведение, химия, биология и технологии переработки продукции растениеводства»

Г. В. Ермолаева², кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник

Е. С. Волкова^{1✉}, кандидат сельскохозяйственных наук

Я. А. Асмус¹, аспирант кафедры «Почвоведение, химия, биология и технологии переработки продукции растениеводства»

¹ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, зд. 1

✉volkova-ivinaelena@yandex.ru

²ФГБНУ «Ульяновский НИИСХ — филиал СамНЦ РАН, 433315, Ульяновская область, Ульяновский район, пос. Тимирязевский, ул. Институтская

Резюме. Изучение влияния технологий возделывания ячменя (интенсивной, интегрированной, биологизированной) на свойства чернозема выщелоченного и урожайность культуры проводили на опытном поле Ульяновского НИИСХ — филиала Самарского НЦ РАН. По интенсивной технологии применяли минеральное удобрение с расчетом на получение 4 т/га зерна и химические средства защиты растений (протравители семян, фунгициды, гербициды, инсектициды). По полностью биологизированной технологии исключали применение любых химических средств (в том числе минеральных удобрений) с заменой их на биологические (биофунгициды, биостимуляторы, биоинсектициды). По интегрированной технологии в дополнение к биологизированной для подавления сорных растений в посевах использовали гербицид Бенито, ККР. Почва опытного поля представлена черноземом слабовыщелоченным тяжелосуглинистым с высокой обеспеченностью легкогидролизующим азотом, высокой - подвижным фосфором и повышенной - подвижным калием, слабоокислой реакцией почвенного раствора. Установили: биологизированные технологии возделывания ячменя благоприятно повлияли на свойства чернозема выщелоченного: количество агрономически ценных агрегатов (0,25...10 мм) в пахотном слое увеличилось на 2,7 % (абсолютное значение); доступной влаги к концу вегетации культуры сохранилось на 2,1 мм в пахотном и на 2,8 мм - метровом слоях больше; активность почвенных микроорганизмов повысилась на 8,3 % в абсолютном значении и на 23 % - относительном. Содержание основных доступных форм элементов питания (азота, фосфора и калия) незначительно было меньше, чем на варианте с применением интенсивной технологии. Урожайность зерна ячменя при возделывании его по полностью биологизированной технологии уступала интенсивной незначительно и составила в среднем за 2 года 3,87 т/га, тогда как по интенсивной - 3,99 т/га. Следовательно, при возделывании сельскохозяйственных культур на черноземах с высокой обеспеченностью элементами питания (азотом, фосфором, калием) в благоприятных условиях вегетации, применяя биологизированные технологии, возможно формирование урожайности зерна, незначительно уступающей интенсивной с использованием минеральных удобрений и других средств химизации.

Ключевые слова: агрофизические и воднофизические, биологические и агрохимические свойства почвы, ячмень, урожайность.

Для цитирования: Влияние технологий возделывания на свойства чернозема выщелоченного и урожайность ячменя / А. Х. Куликова, Г. В. Ермолаева, Е. С. Волкова, Я. А. Асмус // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 64-70. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-64-70

The impact of cultivation technologies on the properties of leached black soil and barley yield

A. Kh. Kulikova¹, G. V. Ermolaeva², E. S. Volkova^{1✉}, Ya. A. Asmus¹

¹FSBEI HE Ulyanovsk State Agriculural University

432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉volkova-ivinaelena@yandex.ru

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture 433315, Ulyanovsk Region, Ulyanovsk District, Timiryazevsky Settlement, Institutskaia Street

Abstract. A study of the impact of barley cultivation technologies (intensive, integrated, and biologized) on the properties of leached chernozem and crop yield was conducted in a test field at the Ulyanovsk Research Institute of Agriculture, a branch of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. The intensive technology utilized mineral fertilizers at a yield of 4 t/ha and chemical plant protection products (seed treatments, fungicides, herbicides, and insecticides). The fully biologized technology eliminated the use of any chemicals (including mineral fertilizers) and replaced them with biological ones (biofungicides, biostimulants, and bioinsecticides). The integrated technology, in addition to the biologized technology, also used the herbicide Benito, KKR, to suppress weeds in the crops. The experimental field soil is

represented by slightly leached heavy loamy chernozem with a high content of readily hydrolyzable nitrogen, high mobile phosphorus, and increased mobile potassium, with a slightly acidic soil solution reaction. It was established that biologized barley cultivation technologies had a favorable effect on the properties of leached chernozem: the amount of agronomically valuable aggregates (0.25-10 mm) in the arable layer increased by 2.7% (absolute value); by the end of the crop growing season, available moisture remained at 2.1 mm in the arable layer and 2.8 mm more in the one-meter layer; the activity of soil microorganisms increased by 8.3% in absolute value and by 23% in relative value. The content of the main available forms of nutrients (nitrogen, phosphorus, and potassium) was slightly lower than in the variant using intensive technology. Barley grain yields when grown using fully biologized technology were only slightly lower than those grown using intensive technology, averaging 3.87 t/ha over two years, compared to 3.99 t/ha when grown using intensive technology. Therefore, when cultivating crops on chernozems with a high supply of nutrients (nitrogen, phosphorus, and potassium) under favorable growing conditions, using biologized technologies, it is possible to achieve grain yields that are only slightly lower than those grown using intensive methods using mineral fertilizers and other chemicals.

Keywords: agrophysical and hydrophysical, biological and agrochemical soil properties, barley, yield.

For citation: The impact of cultivation technologies on the properties of leached black soil and barley yield / A. Kh. Kulikova, G. V. Ermolaeva, E. S. Volkova, Ya. A. Asmus // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 64-70 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-64-70

Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-26-00072, <https://rscf.ru/project/25-26-00072/>.

Введение

Современное растениеводство в большей степени основано на опережающем развитии крупных агропромышленных компаний, которые максимально применяют агрохимикаты, в том числе широкий спектр пестицидов и добиваются высоких результатов в своей деятельности. Однако при этом возможно негативное воздействие последних как на качество получаемой продукции, так и окружающую среду. И, не случайно, в последнее время во всем мире ведется интенсивный поиск альтернативных систем земледелия, которые позволили бы избежать соответствующие последствия широкой химизации при производстве сельскохозяйственной продукции. В этом отношении, прежде всего, приобретает большое значение биологизация технологий возделывания сельскохозяйственных культур вплоть до полной замены химических средств, что представляет существенное органического земледелия [1, 2, 3, 4].

Органическое земледелие по мнению ряда авторов [5, 6, 7, 8, 9, 10] имеет как преимущества, так и возможные вызовы. К несомненным преимуществам относятся:

большая экологическая безопасность получаемой продукции, которая или не содержит, или содержит минимальное количество остатков пестицидов, применяемых в традиционных технологиях с использованием химических веществ;

сохранение биоразнообразия в среде, что является основой поддержания экологической устойчивости окружающей среды и агробиоценозов;

снижение антропогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на окружающую среду и агроэкосистемы;

повышение устойчивости к вредителям и болезням сельскохозяйственных культур;

восстановление и сохранение плодородия почвы.

К вызовам органического земледелия относятся:

возможное снижение урожайности сельскохозяйственных культур, особенно на первых этапах его внедрения;

проблемы защиты растений, так как надежных биологических средств защиты растений от сорняков практически нет. Агротехнические приемы подавления сорняков не всегда применяются в полном объеме;

недостаток знаний и опыта в области применения органического земледелия;

более высокая стоимость продукции органического земледелия.

Вышесказанное обуславливает необходимость глубокого изучения эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур в органическом земледелии.

Цель исследований – изучение влияния технологий возделывания (интенсивной, интегрированной и биологизированной) на свойства чернозема выщелоченного (агрофизические и воднофизические, биологические и агрохимические) и урожайность ячменя.

Материалы и методы

Полевые опыты по изучению сравнительной эффективности интенсивной (с применением минеральных удобрений, химических средств защиты посевов), биологизированной (заменой всех химических средств на биологические) и интегрированной (в дополнение к биологизированной с использованием гербицида) технологий возделывания ячменя осуществляли на базе Ульяновского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала Самарского научного центра Российской академии наук (Ульяновский НИИСХ - филиал СамНЦ РАН). Характеристика препаратов, использованных при возделывании ячменя, приведена в нашей работе [11].

Экспериментальной культурой являлся ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) сорта Камашевский селекции ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН. Сорт включен в Государственный реестр по Волго-Вятскому и Средневолжскому регионам. Устойчив к полеганию,

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

способен формировать высокую урожайность за счет крупности зерна, по его качеству – ценный с содержанием белка 10,5...15,6 %.

Почва опытного поля – чернозем слабовыщелоченный тяжелосуглинистый на желто-бурой тяжелосуглинистой глине. Агрохимические показатели его плодородия следующие: содержание гумуса 5,50...5,95 %, доступных P_2O_5 235-291 мг/кг и K_2O 95...135 мг/кг, обменная кислотность 5,4...5,6 единиц $pH_{КС}$.

Таким образом, чернозем слабовыщелоченный тяжелосуглинистый на опытном поле Ульяновского НИИСХ — филиала СамНЦ РАН характеризуется достаточно высоким уровнем плодородия. Обеспеченность почвы опытного поля доступными растениям фосфора высокая, калием – повышенная,

легкогидролизуемым азотом – высокая, реакция среды – слабокислая.

Погодные условия по температурным и водным режимам вегетации были относительно благоприятными для возделывания зерновых культур (в том числе ячменя).

Результаты

Физическое состояние почвы имеет исключительно важное значение для создания оптимальных почвенных условий для роста и развития культур. Именно оно определяет водно-воздушные, биологические и питательный режимы почвы, обеспечивая нормальное протекание в ней биологических, биохимических и других процессов. В таблице 1 представлено структурное состояние пахотного слоя чернозема выщелоченного в зависимости от технологий возделывания ячменя.

Таблица 1. Структурно-агрегатный состав чернозема выщелоченного под посевами ячменя (2025 г.)

Технология возделывания	Содержание агрегатов, % (сухое просеивание)			К*	Содержание водопрочных агрегатов, %	
	>10 мм	0,25...10 мм	<0,25 мм		3...0,25 мм	<0,25 мм
Интенсивная	27,2	64,5	5,9	1,95	57,2	42,8
Интегрированная	27,6	66,0	6,4	1,94	57,4	42,6
Биологизированная	27,6	67,2	5,2	2,04	57,9	42,1

К* – коэффициент структурности

Структурное состояние чернозема выщелоченного при применении биологизированных технологий возделывания культуры имеет выраженную тенденцию к улучшению: содержание агрономически

ценных агрегатов по отношению к интенсивной повысилось на 2,7 % (абсолютное значение), коэффициент структурности (2,03 единицы) стал оптимальным для данной почвы.

Таблица 2. Запасы продуктивной влаги в почве под посевами ячменя в зависимости от технологий его возделывания, мм

Технология возделывания	10.05.2025		29.07.2025	
	0-30 см	0-100 см	0-30 см	0-100 см
Интенсивная	11,9	82,0	6,0	34,9
Интегрированная	11,0	88,1	7,0	32,9
Биологизированная	14,1	97,5	8,1	37,7

Биологизированная технология возделывания культуры обеспечивала большее сохранение доступной влаги в почве: на варианте с интенсивной технологией запасы ее в начале вегетации составили 82 мм, по биологизированной — 97,5 мм, к концу вегетации соответственно 34,9 и 37,7 мм (табл. 2).

В таблице 3 приведены результаты изучения деятельности почвенных микроорганизмов, определяемой по целлюлолитической активности. Активность почвенных микроорганизмов под посевами ячменя в течение всего вегетационного периода была достаточно высокой и достигала в среднем пахотном слое 36...45 %. При выращивании культуры с использованием только биологических приемов активность микробиоты была значительно (на 23 относительных процента) выше, чем при использовании технологии, основанной на применении химических веществ (минеральных удобрений, пестицидов, деструкторов растительных остатков).

Таблица 3. Влияние технологий возделывания ячменя на биологическую активность целлюлозо-разрушающей микробиоты

Технология возделывания	Слой почвы, см	Активность микробиоты, %	Отклонение от интенсивной, %
Интенсивная	0-10	23,2	0
	10-20	47,9	0
	20-30	37,5	0
	0-30	36,2	0
Интегрированная	0-10	27,5	+4,3
	10-20	44,1	-3,8
	20-30	37,6	+0,1
	0-30	36,4	+0,2
Биологизированная	0-10	27,1	+3,9
	10-20	49,6	+1,2
	20-30	56,7	+19,2
	0-30	44,5	+8,3

При возделывании ячменя по всем технологиям деятельность микроорганизмов в большей степени повышалась в слое почвы толщиной 10...20 см, где сосредоточена наиболее активная часть корневой

системы растений и где были наилучшие условия увлажнения.

Содержание основных элементов питания (NPK) в пахотном слое чернозема выщелоченного (табл. 4) при возделывании ячменя по биологизированной технологии уступало варианту с применением интенсивной технологии: количество аммонийного и нитратного азота в почвенном растворе было меньше на 0,4...0,6 мг/кг, доступных фосфора (P_2O_5) на 3 мг/кг и калия (K_2O) — на 1...4 мг/кг почвы соответственно. Различия в содержании микроэлементов (меди, цинка, марганца) в почве под влиянием технологий возделывания незначительны.

Таблица 4. Агрохимические показатели чернозема выщелоченного при различных технологиях возделывания ячменя (слой почвы 0-20 см), в среднем за вегетацию культуры

Показатель	Технология возделывания	Содержание
Гумус, %	интенсивная	5,61
	интегрированная	5,58
	биологизированная	5,60
(N- NO_3 +N- NH_4), мг/кг	интенсивная	16,8
	интегрированная	16,2
	биологизированная	16,4
P_2O_5 , мг/кг	интенсивная	213
	интегрированная	210
	биологизированная	210
K_2O , мг/кг	интенсивная	97
	интегрированная	96
	биологизированная	96
pH_{KCl} , единицы	интенсивная	5,45
	интегрированная	5,58
	биологизированная	5,60

Особо следует отметить, что при применении биологизированной технологии возделывания улучшается реакция почвенной среды, и почва из слабокислой переходит в категорию, близкую к нейтральной. Последнее очень важно для требовательной к кислотности среды культуры как ячмень (оптимальное pH_{KCl} для ячменя составляет 6,0...7,5 единиц).

Таблица 5. Влияние технологий возделывания на урожайность ячменя

Технология возделывания	Урожайность, т/га			Отклонение от контроля	
	2024 г.	2025 г.	Средняя	т/га	%
Интенсивная	3,85	4,12	3,99	-	-
Интегрированная	3,70	3,72	3,71	-0,28	7
Биологизированная	3,76	3,97	3,87	-0,12	3
HCP_{05}		0,18			

Возделывание ячменя при применении биологизированных технологий сопровождается снижением урожайности культуры: в среднем за 2 года исследований по отношению к интенсивной технологии она уменьшилась на 0,12 и 0,28 т/га, или на 3 и 7 % (табл. 5). При этом, если разница между интенсивной и полностью биологизированной технологиями по формированию урожайности ячменя незначительна (судя

по HCP_{05}), то с применением гербицида на фоне биологизированной технологии существенно: урожайность зерна снизилась в среднем за 2 года на 0,28 т/га. Таким образом, в определенных почвенно-климатических условиях при достаточной обеспеченности элементами питания, применяя при возделывании культур только биологические средства, возможно формирование урожайности, мало уступающей технологии, использующей химические средства.

Обсуждение

Физическое состояние почвы (гранулометрический и агрегатный состав, плотность, пористость, сложение) имеет исключительно важное значение для создания оптимальной почвенной среды для роста и развития культур. Оно обусловлено тем, что, определяя водно-воздушные свойства, физика почвы обеспечивает нормальное протекание в ней биологических, биохимических и других процессов, вследствие чего создается в том числе эффективное плодородие, то есть питательный режим почвы.

Биологизированные технологии возделывания ячменя способствовали улучшению структурного состояния почвы: в пахотном слое повысилось количество как агрегатов размерами 0,25...10 мм (агрономически ценных), так и водопрочных. Последнее имеет особо важное значение, так как «В структурных почвах складывается наиболее благоприятный водно-воздушный режим, благодаря рациональному сочетанию капиллярной и некапиллярной пористости...» [12]. Как будет показано ниже, биологизированные технологии возделывания культуры при оптимальном сочетании достаточной аэрации и влаги в почве способствовали усилению деятельности микроорганизмов почвы и, следовательно, мобилизации питательных веществ в доступной форме.

Многочисленными исследованиями установлено, что влагообеспеченность в Среднем и Нижнем Поволжье является лимитирующим фактором формирования урожайности сельскохозяйственных культур [13, 14].

Ячмень – культура раннего сева и как правило, весенние запасы продуктивной влаги в пахотном слое достаточны для получения нормальных всходов. Однако посевной период 2025 г. складывался таким образом, что запасы доступной влаги в пахотном слое (0...30 см) были недостаточны (по шкале Бондарева А.Г.) для дружных всходов растений. В этих условиях очень важно, что полностью биологизированные технологии благоприятствовали более высокой обеспеченности растений доступной влагой в пахотном слое – выше интенсивной на 2,2 мм. В метровом слое почвы она была больше на 15,5 мм. Преимущество биологизированных технологий в этом отношении сохранялось до конца вегетации. Последнее обусловлено улучшением при этом структурного состояния почвы, что способствует лучшему впитыванию весенних талых вод и снижению потерь воды на испарение.

Почвенные микроорганизмы принимают участие в самых разнообразных протекающих в почве процессах (ферментативных, биохимических, биологических) и, прежде всего, формируют ее эффективное плодородие. Основная роль их при этом заключается в способности переводить труднодоступные и малорастворимые формы элементов питания в соединения, которые могут усваиваться корневой системой растений. Разложение органических веществ в почве (растительных и животных) начинается с процессов аммонификации и нитрификации промежуточных азотсодержащих продуктов. Происходит также трансформация минеральной части почвы, органических и минеральных удобрений, других соединений почвенной системы. Так формируется пул элементов питания в достаточно доступной растениям форме.

Наши исследования показали, что применение полностью биологизированной технологии при возделывании ячменя способствовало значительному повышению активности почвенных микроорганизмов: на 8,3 в среднем в пахотном слое (0...30 см) в абсолютном значении, на 23 % – относительном значении. Усиление микробиологической деятельности в почве несомненно, обусловлено улучшением при этом водно-воздушного режима почвы.

Ячмень предъявляет высокую потребность к элементам питания. При этом в ранний период питания ячмень больше нуждается в азоте, наибольшее количество элементов питания усваивается в фазу кущения. Большую роль в оптимизации питания растений азотом играет калий. Результаты определения доступных растениям минеральных форм азота, фосфора и калия показали, что в среднем за вегетацию культуры содержание их не намного, но ниже по биологизированной технологии возделывания культуры: на 0,4...0,6 мг/кг ($N-NO_3+N-NH_4$), на 3 мг/кг P_2O_5 и на 1...4 мг/кг почвы соответственно. Последнее вполне понятно, так как по интенсивной технологии применяли минеральные удобрения на планируемую урожайность. Однако по содержанию подвижными формами данных элементов почва отличается высокой и повышенной обеспеченностью. Обеспеченность легкогидролизуемым азотом (судя по содержанию гумуса) также высокая. Особо следует отметить, что при применении биологизированной технологии возделывания улучшается реакция почвенной среды, и почва из слабокислой переходит в категорию близкой к нейтральной. Последнее, как уже отмечалось, важно для требовательной к кислотности среды культуры (оптимальная pH_{KCl} для ячменя составляет 6,0...7,5 единиц).

В исследованиях, проведенных по изучению технологий возделывания озимой пшеницы в условиях Среднего Поволжья, также установлено, что содержание основных элементов питания в пахотном слое почвы при применении минеральных удобрений по интенсивной технологии на 15...19 % (относительных) в начале и на 9 % – в конце вегетации

поддерживалось на более высоком уровне по отношению к исходному. Биологизированные технологии в этом отношении поддерживали питательный режим почвы на исходном уровне [15].

На формирование урожайности любых культур влияет множество факторов, которые необходимо учесть при их возделывании. В определенных (конкретных) почвенно-климатических условиях она (урожайность) зависит, прежде всего, от технологий возделывания культур. Результаты наших исследований показали, что биологизированные технологии в этом отношении уступают интенсивной, где применялись минеральные удобрения и химические средства защиты растений. Таким образом, подтверждаются мнения ряда авторов о возможном снижении урожайности сельскохозяйственных культур при возделывании по биологизированным технологиям [16, 17, 10]. Однако разница в урожайности зерна ячменя при возделывании его по интенсивной и полностью биологизированной технологии незначительна, судя по значению НСР₀₅.

Наши полевые эксперименты показали, что при возделывании сельскохозяйственных культур без применения химических средств (минеральные удобрения, пестициды) на достаточно плодородных почвах с высокой обеспеченностью элементами питания возможно формирование урожайности, ненамного уступающей интенсивным технологиям. Появление тенденции снижения урожайности сельскохозяйственных культур в органическом земледелии требует более глубокого изучения технологий их возделывания и влияния как на свойства почвы, так и функционирование в целом системы «почва-растение» в этих условиях.

Заключение

Полностью биологизированная технология возделывания ячменя благоприятно повлияла на свойства чернозема выщелоченного: количество агрономически ценных агрегатов (0,25...10 мм) в пахотном слое увеличилось на 2,7 % (абсолютное значение); количество доступной влаги к концу вегетации культуры сохранилось на 2,1 мм в пахотном и на 2,8 мм – в метровом слоях больше; активность почвенных микроорганизмов повысилась на 8,3 % в абсолютном значении и на 23 % – в относительном. Содержание основных доступных форм элементов питания (азота, фосфора и калия) ненамного было меньше, чем на варианте с применением интенсивной технологии.

Урожайность зерна ячменя при возделывании его без применения минеральных удобрений и химических средств защиты (полностью биологизированной технологии) незначительно уступала интенсивной и составила в среднем за 2 года 3,87 т/га, тогда как по интенсивной – 3,99 т/га. Следовательно, при возделывании сельскохозяйственных культур на черноземах с высокой обеспеченностью элементами питания (азотом, фосфором, калием) в благоприятных условиях вегетации, применяя биологизированную технологию, возможно формирование

урожайности зерна, незначительной уступающей интенсивной с использованием минеральных удобрений и других средств химизации.

Литература

1. Федеральный закон «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 03.08.2018 N 280-ФЗ (последняя редакция) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304017/

2. Ториков В. Е., Сорокин А.Е. Биологизация земледелия как основа развития современного сельского хозяйства // Аграрный вестник Урала. 2011. № 5(84). С. 18-21.

3. Тойгильдин А. Л., Ермолаева Г. В., Никифорова С. А.. Эффективность биологизированной технологии возделывания озимой пшеницы в условиях лесостепной зоны среднего Поволжья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 2(78). С. 50-56. doi:10.12737/2073-0462-2025-50-56. EDN BJPEYG

4. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the activity of enzyme and soil bacterial communities in the mountain red soil / Z. Lu, Y. Zhou, Y. Li, et al. // Front. Microbiol. 2023. No. 14. P. 1234904. doi:10.3389/fmicb.2023.1234904

5. Organic Farming Provides Reliable Environmental Benefits but Increases Variability in Crop Yields: A Global Meta-Analysis, Front. Sustain / O.M. Smith, A.L. Cohen, C.J. Rieser, et al. // Food Syst. 2019. No. 3. P. 82. doi:10.3389/fsufs.2019.00082.

6. Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems / M. Schrama, J.J. Haan, M. Kroonen, et al. // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2018. Vol. 256. P. 123-130. doi: 10.1016/j.agee.2017.12.023

7. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the activity of enzyme and soil bacterial communities in the mountain red soil / Z. Lu, Y. Zhou, Y. Li, et al. // Front. Microbiol. 2023. Vol. 14. P. 1-13. doi: 10.3389/fmicb.2023.1234904

8. Бегназарова Б., Байрамова Г., Акмяммедов Д. Органическое земледелие: преимущества, вызовы и перспективы в современном мире // Матрица научного познания. 2023. № 10-1. С. 92-95.

9. Органическое сельское хозяйство: инновационные технологии, опыт, перспективы / С.А. Коршунов, А.А. Любеведская, А.М. Асатурова и др. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 92 с.

10. Стекольников, К. Е. Органическое земледелие в России - благо или катастрофа? / К. Е. Стекольников // Биосфера. 2020. Т. 12. № 1-2. С. 53-62. doi: 10.24855/BIOSFERA.V12I1.537

11. Технология возделывания ячменя в органическом земледелии в условиях лесостепи Поволжья / А. Х. Куликова, Г. В. Ермолаева, А. А. Пятова и др. // Вестник Ульяновской государственной

сельскохозяйственной академии. 2025. № 3(71). С. 86-92. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-86-92

12. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. М.: «КолосС», 2010. 687 с.

13. Казаков Г.И. Обработка почвы в Среднем Поволжье. Самара: изд-во «Самарский ГСХА», 2008. 251 с.

14. Горянин О. И., Пронович Л. В. Влияние элементов технологий на эффективность возделывания ярового ячменя в засушливых условиях Поволжья // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38/ № 6. С. 11-15. doi:10.53859/02352451_2024_38_6_11. EDN ARKDQJ

15. Эффективность биологизированной технологии возделывания пшеницы мягкой озимой в Среднем Поволжье / Г. В. Ермолаева, А. Х. Куликова, Е. А. Борисов и др. // Земледелие. 2024. № 6. С. 17-21. doi: 10.24412/00443913-2024-6-17-21

16. Productive performance of organic crop farms in Finland 2010–2017 / Kuosmanen, N., Yli-Heikkilä M., Väre M. et al. // Org. Agr. 2021. No.11. P. 379-392. doi:10.1007/s13165-020-00343-x

17. Lepcha N., Mankeb P., Suwanmaneepong S. Productivity and profitability of organic and conventional potato (*Solanum tuberosum* L.) production in West-Central Bhutan // Open Agriculture. 2021. No. 6 (1). P. 640-654. doi:10.1515/opag-2021-0044

References

1. Federal Law "On Organic Products and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" dated 03.08.2018 N 280-FZ (latest revision) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304017/

2. Torikov V. E., Sorokin A. E. Biologization of Farming as a Basis for the Development of Modern Agriculture // Agrarian Bulletin of the Urals. 2011. No. 5 (84). P. 18-21.

3. Toygil'din A. L., Ermolaeva G. V., Nikiforova S. A. Efficiency of Biologized Technology for Cultivating Winter Wheat in the Forest-Steppe Zone of the Middle Volga Region // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. 2025. Vol. 20. No. 2 (78). P. 50-56. doi:10.12737/2073-0462-2025-50-56. EDN BJPEYG.

4. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the activity of enzyme and soil bacterial communities in the mountain red soil / Z. Lu, Y. Zhou, Y. Li, et al. // Front. Microbiol. 2023. No. 14. P. 1234904. doi:10.3389/fmicb.2023.1234904

5. Organic Farming Provides Reliable Environmental Benefits but Increases Variability in Crop Yields: A Global Meta-Analysis, Front. Sustain / O.M. Smith, A.L. Cohen, C.J. Rieser, et al. // Food Syst. 2019. No. 3. P. 82. doi:10.3389/fsufs.2019.00082

6. Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems / M. Schrama, J.J. Haan, M. Kroonen, et al. // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2018. Vol. 256. P. 123-130. doi: 10.1016/j.agee.2017.12.023

7. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on the activity of enzyme and soil bacterial communities in the mountain red soil / Z. Lu, Y. Zhou, Y. Li, et al. // *Front. Microbiol.* 2023. Vol. 14. P. 1-13. doi: 10.3389/fmicb.2023.1234904.

8. Begnazarova B., Bayramova G., Akmyammedov D. Organic farming: advantages, challenges and prospects in the modern world // *Matrix of scientific knowledge.* 2023. No. 10-1. P. 92-95.

9. Organic agriculture: innovative technologies, experience, prospects / S.A. Korshunov, A.A. Lyubovetskaya, A.M. Asaturova, et al. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution "Rosinformagrotech", 2019. 92 p.

10. Stekolnikov, K.E. Organic farming in Russia - blessing or disaster? / K.E. Stekolnikov // *Biosphere.* 2020. Vol. 12. No. 1-2. P. 53-62. doi: 10.24855/BIOSFERA.V12I1.537

11. Technology of barley cultivation in organic farming in the forest-steppe conditions of the Volga region / A. Kh. Kulikova, G. V. Ermolaeva, A. A. Pyatova, et al. // *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy.* 2025. No. 3 (71). P. 86-92. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-86-92

12. Kiryushin V. I. Agronomic soil science. Moscow: "KolosS", 2010. 687 p.

13. Kazakov G. I. Soil cultivation in the Middle Volga region. Samara: Samara State Agricultural Academy Publishing House, 2008. 251 p.

14. Goryanin, O. I., Pronovich, L. V. Influence of Technology Elements on the Efficiency of Spring Barley Cultivation in Dry Conditions of the Volga Region // *Achievements of Science and Technology in the Agro-Industrial Complex.* 2024. Vol. 38. No. 6. P. 11-15. doi:10.53859/02352451_2024_38_6_11. EDN ARKDQJ

15. Efficiency of Biologized Technology for Cultivating Soft Winter Wheat in the Middle Volga Region / G. V. Ermolaeva, A. Kh. Kulikova, E. A. Borisov, et al. // *Agriculture.* 2024. No. 6. P. 17-21. doi: 10.24412/00443913-2024-6-17-21

16. Productive performance of organic crop farms in Finland 2010–2017 / Kuosmanen, N., Yli-Heikkilä M., M. Väre, et al. // *Org. Agr.* 2021. No.11. P. 379-392. doi:10.1007/s13165-020-00343-x

17. Lepcha N., Mankeb P., Suwanmaneepong S. Productivity and profitability of organic and conventional potato (*Solanum tuberosum* L.) production in West-Central Bhutan // *Open Agriculture.* 2021. No. 6 (1). P. 640-654. doi:10.1515/opag-2021-0044

Поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства

А. П. Юрков¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории № 4 экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий

А. А. Крюков¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории № 4 экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий

С. Н. Никитин²✉, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии»

196608, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, 3

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.С. Немцева

433315, Ульяновская область, пос. Тимирязевский, ул. Институтская, 19

✉ s_nikitin@mail.ru

Резюме. Широко известна роль грибов арбускулярной микоризы в повышении продуктивности растений и усилении их адаптации к абиотическим стрессам. В связи с этим поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства является одной из наиболее актуальных задач. Способы отбора эффективных грибов ранее не были стандартизированы. В работе использован недавно запатентованный вегетационный способ оценки симбиотической эффективности грибов и их активности в корне с применением модельного растения-хозяина в условиях низкого для питания растений уровня доступного фосфора в почве. В лабораторных и вегетационных опытах проведена оценка симбиотической эффективности и активности одиннадцати грибов арбускулярной микоризы, которая показала значительный полиморфизм по этим параметрам. При анализе четырех параметров продуктивности (сырой массы и сухого вещества в надземных частях, числа листьев и высоты главного стебля) выявлены не только четыре эффективных изолята (включая тестовый штамм RCAM00320), но также четыре неэффективных изолята, которые наряду с первыми могут использоваться для исследования механизмов развития эффективного взаимодействия грибов и растений. Выявлен полиморфизм по симбиотической эффективности, рассчитанной по прибавке сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях, которая варьировала у эффективных грибов в широком диапазоне 46-314% и 60-304% соответственно. По результатам микроскопии корней показатели микоризации изолятов имели достоверную ($p < 0.01$) положительную линейную связь с параметрами продуктивности, исключая показатель А (обилие арбускул в корне). Наиболее эффективные изоляты (115Te, 121Te, 184.1Te) и штамм RCAM00320 рекомендуются к наработке в лабораторных условиях и оценке эффективности в полевых условиях.

Ключевые слова: тестирование эффективности грибов, симбиотическая эффективность, микоризация, инокуляция грибом, люцерна хмелевидная.

Для цитирования: Юрков А. П., Крюков А. А., Никитин С.Н. Поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 71-76. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-71-76

The search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use

Yurkov A.P.¹, **Kryukov A.A.**¹, **Nikitin S.N.**²✉

¹Federal State Budget Scientific Institution "All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology"

196608, St.Petersburg, Pushkin, Podbelsky chausse, 3

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture named after N.S. Nemtsev

433315, Ulyanovsk region, Timiryazevsky settlement, Institutsкая St., 19

✉ s_nikitin@mail.ru

Abstract. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in increasing plant productivity and enhancing their adaptation to abiotic stresses is widely known. In this regard, the search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use is one of the most urgent tasks. The methods of selecting effective fungi have not been standardized before. In this study we use a recently patented vegetative method for evaluating the symbiotic efficiency of fungi and their activity in the roots using a model host plant in conditions of low level of available phosphorus in the soil for plant nutrition. In laboratory and vegetation experiments the symbiotic efficiency and activity of eleven arbuscular mycorrhiza fungi were evaluated, which showed significant polymorphism in these parameters. The analysis of four productivity parameters (fresh weight and dry matter in aboveground parts, the number of leaves and the height of the main stem) revealed not only four effective isolates (including the test strain RCAM00320), but also four ineffective isolates, which, along with ones, can be used to

study the mechanisms of development of effective interaction between fungi and plants. The polymorphism in symbiotic efficiency was revealed, calculated by the increase in fresh weight and dry mass of the aboveground parts, which varied in effective fungi in a wide range of 46-314% and 60-304%, respectively. According to the results of root microscopy, the indicators of mycorrhization of isolates had a significant ($p < 0.01$) positive linear correlation with productivity parameters, excluding A (abundance of arbuscules in the root). The most effective isolates (115Te, 121Te, 184.1Te) and strain RCAM00320 are recommended for use in the laboratory experiments and evaluation of effectiveness in the field. The research was carried out with support of the Russian Science Foundation (RSF) No. 22-16-00064-п.

Keywords: fungal efficiency testing, symbiotic efficiency, mycorrhization, fungal inoculation, black medic.

For citation: Yurkov A.P., Kryukov A.A., Nikitin S.N. The search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 71-76 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-71-76

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-16-00064-П.

Введение

Развитие сельского хозяйства требует новых подходов для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и их адаптации к стресс-факторам среды. Одним из подходов является применение биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы (АМ). Грибы АМ относятся к классу Glomeromycetes, обладают широким спектром действия, усиливая питание растений, особенно фосфорное и стимулируя процессы фотосинтеза [1-3]. Они характеризуются отсутствием специфичности по отношению к растению-хозяину и формируют симбиоз с большинством наземных растений, исключая лишь некоторые семейства – гречишные, крестоцветные, маревые, осоковые, гвоздичные, ситниковые, в семействе бобовых – люпин. Показана значительная роль грибов АМ в защите растений от абиотических стрессов: засухи, засоления, токсичности тяжелых металлов и др. [2-3], но усиление иммунитета растений при микоризации во многом зависит от видоспецифических взаимодействий партнеров симбиоза [4]. Имеется значительный опыт применения микоризных биопрепаратов в сельском хозяйстве за рубежом [5, 6], но внедрение в России находится на начальном этапе развития в связи с отсутствием крупных коллекций штаммов, а также биопрепаратов с высокой эффективностью. Тем не менее, недавно опубликованные данные показали значительное повышение рентабельности возделывания сорго зернового при использовании микоризного инокулянта на основе штамма RCAM00320 *Rhizophagus irregularis* – на 15% при прибавке урожайности зерна на 10 % [7].

Применение микробных препаратов ограничивает высокая изменчивость симбиоза в зависимости от условий. Так, в частности полезный микроорганизм редко, но способен перейти от мутуализма к паразитизму [5]. Имеются и обратные эффекты снижения показателей микоризации в условиях появления растительных видов-интродуцентов [8-9]. Таким образом, для промышленного применения микоризных инокулянтов требуется найти компромисс между максимальной эффективностью и гарантированной безопасностью взаимодействия. В этой связи совершенствование техники поиска эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы является весьма актуальной проблемой современного сельского хозяйства, в основе которого лежат принципы

почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Коллективом разработан и запатентован способ экспресс-оценки эффективности и активности штаммов [10]. Для формирования первой в России коллекции грибов АМ под руководством Юркова А.П. проведен ряд экспедиций в горы Кавказа и Алтая, а также на Европейской территории России в рамках ряда проектов в 2015-2018 гг. (РФФИ-офи_м №15-29-02753), в 2019-2021 гг. (РФФИ-мк №19-29-05275) и в 2022-2026 гг. (РНФ №22-16-00064/№22-16-00064-П). Выявлен первый в России центр биоразнообразия грибов АМ в долине реки Теберда на Северном Кавказе (43°25'12.0" N 41°43'45.0" E), насчитывающий не менее 50 видов [11]. Представляется целесообразным анализ ряда выделенных изолятов грибов АМ из данного региона. Целью исследования является оценка симбиотической эффективности и показателей микоризации изолятов грибов АМ, выделенных на Северном Кавказе, и рекомендация эффективных грибов для нужд сельского хозяйства.

Материалы и методы

Растительный и грибной материал. В качестве модельного объекта использовали линию MIS-1 *Medicago lupulina* L. [12]. Люцерна хмелевидная используется при рекультивации нарушенных земель в качестве кормовой культуры и сидерата [13]. В качестве микросимбионтов взяты 10 изолятов грибов АМ из коллекции ФГБНУ ВНИИСХМ (табл. 1), выделенных с Северного Кавказа, формирующие внутрикорневые структуры (арбускулы, везикулы и мицелий), а также тестовый эффективный штамм гриба АМ RCAM00320 *Rhizophagus irregularis*, который показал высокую симбиотическую эффективность на более чем 30 видах культурных растений. Грибы поддерживались на растении-хозяине (*Plectranthus australis* R.Br.). Чтобы инокулировать растения люцерны, в эксперименте использовали фрагменты корней, содержащие в среднем 100 везикул на один проросток люцерны.

Таблица 1. Изоляты грибов АМ, место их изоляции, высота

№ изолята / штамма	Географические координаты	Высота над уровнем моря, м
189.1Te	43°51'38.0"N 41°54'22.0"E	795
129.1Te	43°25'51.0"N 41°42'55.0"E	2186
174Te	43°39'37.0"N 41°53'12.0"E	1026
161.3Te	43°25'48.0"N 41°42'31.0"E	2401
172Te	43°39'35.0"N 41°53'13.0"E	1028

155Te	43°18'05.0"N 41°33'49.0"E	1957
115Te	43°17'42.0"N 41°39'12.0"E	2540
121Te	43°25'50.0"N 41°42'20.0"E	2437
RCAM00320	59°27'18.0"N 30°05'24.0"E	77
159Te	43°39'35.0"N 41°53'13.0"E	1028
184.1Te	43°51'38.0"N 41°54'22.0"E	795

Схема эксперимента. Опыт проведен на базе ФГБНУ ВНИИСХМ (г. Санкт-Петербург) в лабораторных и вегетационных условиях [12]. Растения выращивали в контролируемых стерильных условиях при фотопериоде 18/6 ч, температуре воздуха 24...26 °С, относительной влажности воздуха ~60 %, фотосинтетически активной радиации 150 мкмоль/м²/с и поливе через день для поддержания 0,6 полной влагоемкости почвы. Для выращивания использовали автоклавированный субстрат – песок и почва 1:2 по весу (дерново-подзолистая суглинистая с низким содержанием доступного фосфора – 1,7 мг на 100 г; калий – 6,5 мг на 100 г; Сорг – 3,6 %; рН_{KCl} – 6,4, рН_{H2O} – 7,3). Семена люцерны скарифицировали (5 мин в концентрированной серной кислоте), стратифицировали (в течение 24 ч) и после проращивали (в течение 48 ч). В каждый сосуд, содержащий по 210 г субстрата, высевали по 2 проростка, которые инокулировали одним из штаммов грибов АМ или оставляли без инокуляции (контроль). Учёт продуктивности (сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях, числа листьев, высоты главного стебля) и микроскопический анализ проводили на 36-й день в фазу бокового ветвления. Симбиотическую эффективность рассчитывали по формуле Ю. Одума как прибавку показателя продуктивности при микоризации против контроля без инокуляции грибом АМ.

Оценка параметров микоризации. Для оценки развития симбиоза использовали препараты корней, окрашенные трипановым синим [14]. С помощью световой микроскопии на микроскопе CX43 (Olympus, Япония) и специализированного ПО –

Программы вычисления индексов микоризации корней растений [15] определяли стандартные индексы микоризации: встречаемость АМ-инфекции (F), интенсивность микоризации в корне (M), обилие арбускул (A) и везикул (B) в корне [16].

Статистический анализ. Рассчитывали средние значения и ошибку средней (биологическая повторность – 10). Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) и апостериорного теста Тьюки в программе STATISTICA v.12.0 (StatSoft, США). Различия средних показателей продуктивности считали статистически значимыми при $p < 0.01$.

Результаты

В результате анализа показателей продуктивности, сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях (НЧ) одного растения, числа листьев, высоты главного стебля был выявлен полиморфизм грибов АМ, изолированных из разных экосистем Северного Кавказа, по симбиотической эффективности взаимодействия с растением-хозяином – линией MIS-1 люцерны хмелевидной. Так, были выявлены четыре изолята, показавшие симбиотическую эффективность по всем 4 параметрам продуктивности (115Te, 121Te, 184.1Te, RCAM00320; табл. 2) и три изолята, характеризующиеся отсутствием АМ-эффективности по всем 4 параметрам (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te). Эти данные свидетельствуют о наличии контрастных по исследуемому признаку генотипам грибов АМ. Наибольшей эффективностью по массе надземных частей (как сырой, так и сухой) обладал изолят 184.1Te, причем он имел характеристики даже выше тестового штамма RCAM00320 R. irregularis. Между тем, наименьшими показателями продуктивности характеризовались растения, инокулируемые изолятом 189.1Te. Эти контрастные изоляты были собраны из одного местообитания (табл. 1).

Таблица 2. Показатели продуктивности люцерны хмелевидной при инокуляции изолятами грибов АМ и симбиотическая эффективность, рассчитанная по ним

№ изолята / штамма	Сырая масса НЧ 1 растения, мг	Масса сухого вещества НЧ 1 растения, мг	Число листьев	Высота, см	Симбиотическая эффективность (%), рассчитанная по:			
					сырой массе НЧ	массе сухого вещества НЧ	числу листьев	высоте стебля
безМ	171,6	25,6	3,8	3,0	0	0	0	0
189.1Te	162,6	25,2	3,9	2,6	-5,2	-13,4	0,5	-13,3
129.1Te	172,8	24,4	4,0	2,4	0,7	-4,6	4,3	-20,0
174Te	184,8	27,5	4,0	1,8	7,7	22,9	4,3	-40,0
161.3Te	227,4	35,3	5,1	2,0	32,5	37,9	33	-32,0
172Te	250,2	40,9	5,6	2,1	45,8*	59,7*	46,7*	-30,0
155Te	292,5	46,3	6,3	2,8	70,5*	80,8*	63,0*	-6,0
115Te	523,8	92,3	7,8	5,4	205,2*	260,5*	102,2*	80,0*
121Te	562,2	101,0	9,3	5,4	227,6*	271,2*	141,3*	78,3*
RCAM00320	573,6	102,0	8,9	6,1	234,3*	298,5*	131,5*	101,7*
159Te	581,4	100,3	8,8	4,1	238,8*	323,0*	128,3*	35,0
184.1Te	709,8	123,3	9,8	6,2	313,6*	303,5*	154,3*	105,0*

Примечание: "НЧ" – надземные части, * – значение показателя продуктивности статистически достоверно ($p < 0,01$) отличается от значения в варианте "безМ" (контроль без инокуляции грибом АМ), достоверная эффективность гриба АМ. Образцы с инокуляцией изолятами грибов ранжированы по возрастанию сырой массы НЧ.

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

Анализ показателей активности микоризации, встречаемости АМ-инфекции (F), интенсивности микоризации в корне (M), обилия арбускул (A) и везикул (B) в корне показал, что изоляты характеризовались значительным размахом индексов микоризации. Тестовый штамм RCAM00320 еще не полностью развился (мицелий занимает лишь около половины

корней, F) в отличие от изолята 121Te, инокуляция которым уже в фазу бокового ветвления люцерны привела к активному развитию мицелия в корнях растения ($F > 90\%$). Интенсивность микоризации, M , обилие арбускул, A и обилие везикул, B , при инокуляции изолятом 121Te также были наивысшими.

Таблица 3. Показатели микоризации люцерны хмелевидной при инокуляции изолятами грибов АМ

№ изолята / штамма	$F, \%$			$M, \%$			$A, \%$			$B, \%$		
189.1Te	50,0	±	5,2	28,5	±	3,5	12,3*	±	1,3	0,2*	±	0,1
129.1Te	27,8*	±	2,0	14,3*	±	1,7	11,6*	±	1,0	0,1*	±	0,1
174Te	14,5*	±	0,8	5,6*	±	0,8	12,7*	±	1,9	1,4*	±	0,9
161.3Te	27,8*	±	2,3	11,2*	±	1,2	12,5*	±	1,7	2,8*	±	0,6
172Te	28,2*	±	5,2	9,9*	±	1,8	3,9*	±	1,5	0,1*	±	0,1
155Te	52,2	±	6,8	25,3	±	2,8	19,1	±	5,2	5,1	±	1,3
115Te	37,5*	±	2,5	34,1	±	6,4	7,6*	±	1,4	2,3*	±	0,6
121Te	93,8	±	8,2	40,9	±	5,4	30,2	±	3,2	15,3	±	5,3
RCAM00320	53,8	±	5,8	29,9	±	4,1	20,5	±	3,0	6,5	±	1,9
159Te	45,0	±	3,0	28,2	±	5,2	18,2	±	2,6	7,7	±	2,5
184.1Te	78,8	±	10,5	43,6	±	7,4	23,0	±	5,3	10,8	±	2,9

Примечание: “*” – значение показателя микоризации достоверно ($p < 0,01$) ниже, чем у тестового штамма RCAM00320.

Не все изоляты из группы неэффективных (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te) имели показатели активности ниже, чем при инокуляции тестовым штаммом RCAM00320. Несмотря на это, была выявлена линейная корреляционная взаимосвязь между показателями продуктивности и микоризации.

Линейный коэффициент корреляции Пирсона (r) между массой сухого вещества и показателями M и B был достоверным ($p < 0,01$), а достоверная корреляция между всеми показателями продуктивности с обилием арбускул, A , отсутствовала (табл. 4).

Таблица 4. Корреляция между параметрами продуктивности и активностью гриба АМ в корне растения-хозяина

Параметры продуктивности и микоризации	Сырая масса НЧ 1 растения	Масса сухого вещества НЧ 1 растения	Число листьев	Высота
F	0,72*	0,66	0,77*	0,68
M	0,87*	0,83*	0,87*	0,84*
A	0,65	0,62	0,70	0,56
B	0,81*	0,78*	0,85*	0,71*

Примечание: “*” – достоверно ($p < 0,01$) значимая величина r .

Обсуждение

В результате исследования выявлены как эффективные генотипы грибов АМ, обладающие достоверной симбиотической эффективностью (изоляты 115Te, 121Te, 184.1Te и штамм RCAM00320), так и неэффективные (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te; табл. 2). Показано наличие полиморфизма изолятов грибов АМ по показателям симбиотической эффективности, рассчитанным по таким параметрам продуктивности растения-хозяина, как сырая масса, сухое вещество в надземных частях, число листьев и высота главного стебля. Выявлено, что эффективность АМ не всегда связана с высокой активностью гриба в корне растения, о чем свидетельствует наличие высоких показателей F и M у неэффективного изолята 189.1Te (табл. 3), выделенного из той же экосистемы, что и эффективный изолят 184.1Te (табл. 1). На взаимосвязи показателей продуктивности (и эффективности АМ) с показателями активности грибов АМ в корне могут оказывать влияние ряд неучтенных факторов, хотя корреляция между этими параметрами может

быть достаточно значимой (до $r < 0,87$; табл. 4). Аналогично положительная взаимосвязь была показана ранее, например, в растительно-микробной системе “*Berkheya coddii* + *Rhizophagus intraradices*” между показателем сухого веса надземных частей с F , M и A ($r = 0,68-0,76$, $0,71-0,76$ и $0,71-0,77$, соответственно, в зависимости от способа оценки микоризации) [17]. На основании вышесказанного следует расширить исследования, связанные с охватом большего числа факторов, от которых зависит взаимодействие гриба АМ с растением-хозяином. Это позволит более детально выяснить условия формирования наиболее эффективного взаимодействия, что особенно важно в условиях засухи [18]. С другой стороны, эффективность зависит от способа инокуляции растения. Существуют три основные формы препаратов на основе грибов АМ – полусухие твердые, жидкие инокулянты и инокулянты для покрытия семян [6]. Предложенные нами штаммы могут использоваться в составе твердых инокулянтов, включающих ризосферную почву с мицелием, спорами и спорокарпами грибов

АМ, а также резаные микоризованные корни, заполненные в значительной степени грибными структурами – арбускулами, мицелием и везикулами. Среди последних к симбиотическим структурам относятся арбускулы и внутрикорневой мицелий, через которые идет наиболее активный транспорт питательных веществ между партнерами симбиоза. На российском рынке представлены единичные препараты АМ, еще не прошедшие полный цикл государственной регистрации. Между тем, известно значительное число зарубежных АМ-инокулянтов, например, Ctospor (Biofabrica, Мексика), Rhizophor, Micorricafar, Rhibio m+ (INIFAP, Мексика), Micosat F (Centro Colture Sperimentali, Италия), Myke Pro SG2 (Premier Tech Biotechnologies, Канада), Myke Pro (Кот-д’Ивуар) и др. [5]. Разработка российского биопрепарата на основе создаваемой коллекции грибов АМ во ФГБНУ ВНИИСХМ является перспективным прикладным направлением исследований.

Заключение

В результате исследования показан существенный полиморфизм грибов АМ по симбиотической эффективности на линии MIS-1 *Medicago lupulina*. Выявлены 3 новых эффективных изолята (115Te, 121Te, 184.1Te) и 4 неэффективных (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te). Взаимосвязь показателей активности грибов АМ с их симбиотической эффективностью требует дальнейших исследований.

Литература

1. Co-application of arbuscular mycorrhizae via seed coating and phosphorus fertilizer for enhancing growth, yield, and nutrient uptake in ultisols for maize / M. Marwanto, H. Bustamam, M. Handajaningih, et al. // TERRA: Journal of Land Restoration. 2024. No. 7. P. 8-13. doi:10.31186/terra.7.1.8-13
2. Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi / S. Cheng, Y.-N. Zou, K. Kuča, et al. // Frontiers in Microbiology. 2021. No. 12. P. 809473. doi:10.3389/fmicb.2021.809473
3. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture / M. Umer, N. Anwar, M. Mubeen, et al. // Front. Microbiol. 2025. No. 16. P. 1616273. doi:10.3389/fmicb.2025.1616273
4. Kaur S., Suseela V. Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome // Metabolites. 2020. Vol. 10 No. 8. P. 335. doi:10.3390/metabo10080335
5. Ghorui M., Chowdhury S., Burla S. Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants // Frontiers in Industrial Microbiology. 2025. No. 3. P. 1553472. doi:10.3389/finmi.2025.1553472
6. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Core Engineers in Synthetic Microbial Communities: Boosting Plant Growth and Soil Health for Sustainable Agriculture / Y. Zeng, Y. Wang, X. Wang, et al. // Journal of Fungi. 2025. No. 11. P. 769. doi:10.3390/jof11110769
7. Сравнительная оценка применения современных биопрепаратов ФГБНУ ВНИИСХМ на продуктивность кукурузы и сорго зернового в условиях южной природно-сельскохозяйственной зоны Ростовской области / С. А. Васильченко, Г. В. Метлина, А. П. Юрков и др. // Зерновое хозяйство России. 2025. № 17(4). С. 77-83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83
8. Веселкин Д.В., Бетехтина А.А., Гусев А.П. У микоризных чужеродных растений белорусского поля снижена интенсивность формирования арбускул. // Экология. 2022. Т. 60 № 3. С. 161-170. doi:10.31857/S036705972203012X
9. Веселкин Д. В., Дубровин Д. И., Рафикова О. С. В сообществах с доминированием инвазионного дерева *Acer negundo* избирательно снижается встречаемость арбускулярно-микоризных трав. // Доклады Российской Академии Наук. Науки о жизни. 2024. Т. 518. № 1. С. 31–35 doi:10.31857/S2686738924050063
10. Способ оценки качества биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы; пат. 2776652 Рос. Федерация: МПК C12Q 1/00 (2006.01) / А. П. Юрков; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИСХМ. - № 2021136951; заявл. 14.12.21; опубл. 22.07.22, Бюл. № 21, 2 с.: ил
11. The biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in some ecosystems of the North Caucasus temperate hotspot / A. P. Yurkov, A. A. Kryukov, A. O. Gorbunova, et al. // Journal of Fungi. 2024. Vol. 10 No. 1. P. 11. doi:10.3390/jof10010011
12. The effect of arbuscular mycorrhizal fungus and phosphorus treatment on root metabolome of *Medicago lupulina* during key stages of development / A. P. Yurkov, R. K. Puzanskiy, A. A. Kryukov, et al. // Plants. 2025. No. 14. P. 2685. doi:10.3390/plants14172685
13. Особенности биохимического состава жизненных форм люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.) / Н. Ю. Малышева, Т. В. Шеленга, А. Е. Соловьева и др. // Экологическая генетика. 2022. Т. 20 № 3. С. 231-242. doi:10.17816/ecogen109231
14. Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // Transactions of the British Mycological Society. 1970. No. 55. P. 158-161. doi:10.1016/s0007-1536(70)80110-3
15. Свидетельство №2016612112 от 12.02.2016 о регистрации программы ЭВМ “Программа вычисления индексов микоризации корней растений”. / Н. И. Воробьев, А. П. Юрков, Н. А. Проворов. – Москва: ФИПС. 2016.
16. Mesure du taux de mycorrhization VA d’un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // In: les Mycorrhizes: physiologie et génétique. Eds. V. Gianinazzi-Pearson, S. Gianinazzi. – Paris: INRA-Press. 1986. P. 217-221.
17. The effect of mycorrhiza on the growth and elemental composition of Ni-hyperaccumulating plant *Berkheya coddii* Roessler / E. Orłowska, W. Przybyłowicz, D.

Orlowski, et al. // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159 No. 12. P. 3730-3738. doi:10.1016/j.envpol.2011.07.008

18. Аквапорины и их роль в растительно-микробных системах / Т. Р. Кудряшова, А. А. Крюков, А. И. Горенкова и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2025. Т. 29. № 2. С. 238-247. doi:10.18699/vjgb-25-27

References

1. Co-application of arbuscular mycorrhizae via seed coating and phosphorus fertilizer for enhancing growth, yield, and nutrient uptake in ultisols for maize / M. Marwanto, H. Bustamam, M. Handajningsih, et al. // TERRA: Journal of Land Restoration. 2024. No. 7. P. 8-13. doi:10.31186/terra.7.1.8-13
2. Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi / S. Cheng, Y.-N. Zou, K. Kuča, et al. // Frontiers in Microbiology. 2021. No. 12. P. 809473. doi:10.3389/fmicb.2021.809473
3. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture / M. Umer, N. Anwar, M. Mubeen, et al. // Front. Microbiol. 2025. No. 16. P. 1616273. doi:10.3389/fmicb.2025.1616273
4. Kaur S., Suseela V. Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome // Metabolites. 2020. Vol. 10 No. 8. P. 335. doi:10.3390/metabo10080335
5. Ghorui M., Chowdhury S., Burla S. Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants // Frontiers in Industrial Microbiology. 2025. No. 3. P. 1553472. doi:10.3389/finmi.2025.1553472
6. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Core Engineers in Synthetic Microbial Communities: Boosting Plant Growth and Soil Health for Sustainable Agriculture / Y. Zeng, Y. Wang, X. Wang, et al. // Journal of Fungi. 2025. No. 11. P. 769. doi:10.3390/jof11110769
7. Comparative assessment of the use of modern biopreparations of the All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology on the productivity of corn and grain sorghum in the conditions of the southern natural and agricultural zone of the Rostov Region / S. A. Vasilchenko, G. V. Metlina, A. P. Yurkov, et al. // Grain Economy of Russia. 2025. No. 17(4). P. 77-83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83
8. Veselkin D. V., Betekhtina A. A., Gusev A. P. The intensity of arbuscule formation is reduced in mycorrhizal alien plants of the Belarusian Polesie. // Ecology. 2022. Vol. 60, No. 3, pp. 161–170. doi:10.31857/S036705972203012X
9. Veselkin D.V., Dubrovin D.I., Rafikova O.S. In communities dominated by the invasive tree *Acer negundo*, the occurrence of arbuscular mycorrhizal grasses selectively decreases. // Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences. 2024. Vol. 518, No. 1, pp. 31–35. doi:10.31857/S2686738924050063
10. Method for assessing the quality of biopreparations based on arbuscular mycorrhiza fungi; patent. 2776652 Russian. Federation: IPC C12Q 1/00 (2006.01) / A. P. Yurkov; applicant and patent holder FGBNU VNIISKHM. - No. 2021136951; declared 14.12.21; published 22.07.22, Bulletin No. 21, 2 p.: ill
11. The biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in some ecosystems of the North Caucasus temperate hotspot / A. P. Yurkov, A. A. Kryukov, A. O. Gorbunova, et al. // Journal of Fungi. 2024. Vol. 10 No. 1. P. 11. doi:10.3390/jof10010011
12. The effect of arbuscular mycorrhizal fungus and phosphorus treatment on the root metabolome of *Medicago lupulina* during key stages of development / A. P. Yurkov, R. K. Puzanskiy, A. A. Kryukov, et al. // Plants. 2025. No. 14. P. 2685. doi:10.3390/plants14172685
13. Features of the biochemical composition of life forms of alfalfa (*Medicago lupulina* L.) / N. Yu. Malysheva, T. V. Shelenga, A. E. Solovieva, et al. // Ecological Genetics. 2022. Vol. 20 No. 3. P. 231-242. doi:10.17816/ecogen109231
14. Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // Transactions of the British Mycological Society. 1970. No. 55. P. 158-161. doi:10.1016/s0007-1536(70)80110-3
15. Certificate No. 2016612112 dated 12.02.2016 on registration of the computer program "Program for calculating mycorrhization indices of plant roots" / N. I. Vorobyov, A. P. Yurkov, N. A. Provorov. - Moscow: FIPS. 2016.
16. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // In: les Mycorrhizes: physiologie et génétique. Eds. V. Gianinazzi-Pearson, S. Gianinazzi. - Paris: INRA-Press. 1986. P. 217-221.
17. The effect of mycorrhiza on the growth and elemental composition of Ni-hyperaccumulating plant *Berkeheyia coddii* Roessler / E. Orłowska, W. Przybyłowicz, D. Orlowski, et al. // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159 No. 12. P. 3730-3738. doi:10.1016/j.envpol.2011.07.008
18. Aquaporins and their role in plant-microbial systems / T. R. Kudryashova, A. A. Kryukov, A. I. Gorenkova, et al. // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2025. Vol. 29. No. 2. P. 238-247. doi:10.18699/vjgb-25-27

4.2.1. Патология животных, морфология, физиология, фармакология и токсикология (ветеринарные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-77-83

УДК: 619:615.322: 57.085.23: 615.31

Изучение фармакотерапевтических свойств препарата на основе берберина, конъюгированного с наночастицами селена при индуцированном тетрахлорметаном экспериментальном гепатите у мышей

С. В. Козлов✉, доцент, доктор ветеринарных наук, доцент, профессор кафедры «Болезни животных и ВСЭ»

А. А. Шелковая, аспирант

Н. И. Денисова, кандидат ветеринарных наук, ассистент кафедры «Болезни животных и ВСЭ»

Е. С. Козлов, ассистент кафедры «Болезни животных и ВСЭ»

ФГБОУ ВО Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова

410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3.

✉kozlovsv12@yandex.ru

Резюме. Исследование было проведено для оценки фармакотерапевтической активности препарата на основе берберина, конъюгированного с наночастицами селена (BRB-nSe) при остром токсическом повреждении печени мышей, индуцированным тетрахлорметаном (CCl₄). В ходе эксперимента по изучению терапевтической активности препарата BRB-nSe на модели острого токсического гепатита в первой группе мышей, которым на фоне тетрахлорметановой интоксикации терапия не проводилась, гибель составила 50 %, во второй группе, мышам которой на следующие сутки после введения четыреххлористого углерода назначили испытуемый препарат BRB-nSe парентерально в дозе 100 мг/кг по лекарственной форме 1 раз в день ежедневно на протяжении всего опыта – 10 % и в третьей (интактной) группе признаков интоксикации и летальных исходов не зарегистрировано. Через сутки после интоксикации тетрахлорметаном у животных отмечали гиподинамию, отказ от корма, нарушение груминга, достоверное повышение лейкоцитов в 2,6 раза, что составило $22,56 \times 10^9/L$, за счет гранулоцитов $10,84 \times 10^9/L$, количество которых увеличилось в 5,5 раза относительно интактной группы мышей. В сыворотке крови отмечали увеличение активности индикаторных ферментов печени аланинаминотрансферазы (АЛТ) в 9 раз, что составило 645 ± 107 Е/л, аспартатаминотрансферазы (АСТ) – в 3 раза, что составило 752 ± 114 Е/л, а также достоверное снижение концентрации сывороточной глюкозы в 2 раза, что составило $3,04 \pm 0,81$ ммоль/л относительно контрольной группы животных. Вместе с этим введение испытуемого препарата на основе берберина, конъюгированного с наночастицами селена в течение 7 дней, способствовало купированию клинических симптомов интоксикации, привело к восстановлению показателей лейкоцитов $4,88 \times 10^9/L$ и гранулоцитов $1,42 \times 10^9/L$ до физиологической нормы и снижению активности ферментов печени АЛТ до $48,7 \pm 7,3$ Е/л, АСТ до 172 ± 31 Е/л.

Ключевые слова: селен, Берберин, наночастицы, гепатоциты, нанотехнологии, биодоступность.

Для цитирования: Изучение фармакотерапевтических свойств препарата на основе берберина, конъюгированного с наночастицами селена при индуцированном тетрахлорметаном экспериментальном гепатите у мышей // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 77-83. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-77-83

Study of the pharmacotherapeutic properties of a berberine-based preparation conjugated with selenium nanoparticles in experimental tetrachloromethane-induced hepatitis in mice

S. V. Kozlov✉, **A. A. Shelkovaya**, **N. I. Denisova**, **E. S. Kozlov**

410012, Saratov, Petra Stolypina Avenue, Building 4

✉kozlovsv12@yandex.ru

Abstract. The study aimed to assess the pharmacotherapeutic activity of a berberine-based drug conjugated with selenium nanoparticles (BRB-nSe) in cases of acute liver damage caused by carbon tetrachloride (CCl₄) in mice. In the experiment examining the therapeutic activity of BRB-nSe, a model of acute toxic hepatitis was used. In the first group of mice, which did not receive treatment for tetrachloromethane intoxication, mortality reached 50%. In the second group, where the test drug BRB-nSe was administered parenterally at a dose of 100 mg/kg once a day starting the day after carbon tetrachloride administration, mortality was 10%. The third (intact) group showed no signs of intoxication or fatalities. A day after the carbon tetrachloride intoxication, the animals exhibited reduced physical activity, refusal to eat, grooming disturbances, and a statistically significant 2.6-fold increase in white blood cell count ($22.56 \times 10^9/L$), primarily due to a 5.5-fold increase in granulocytes ($10.84 \times 10^9/L$) compared to the intact group. Blood serum analysis revealed a 9-fold increase in alanine aminotransferase (ALT) activity (645 ± 107 U/L) and a 3-fold increase in aspartate aminotransferase (AST) activity

(752 ± 114 U/L). Additionally, serum glucose concentration decreased by half (3.04 ± 0.81 mmol/L) compared to the control group. Administration of the test drug (berberine conjugated with selenium nanoparticles) for 7 days helped alleviate the clinical symptoms of intoxication, restored leukocyte and granulocyte counts to physiological norms (4.88×10^9 /L and 1.42×10^9 /L, respectively), and reduced ALT activity to 48.7 ± 7.3 U/L and AST activity to 172 ± 31 U/L.

Keywords: selenium, berberine, nanoparticles, hepatocytes, nanotechnology, bioavailability.

For citation: Study of the pharmacotherapeutic properties of a berberine-based preparation conjugated with selenium nanoparticles in experimental tetrachloromethane-induced hepatitis in mice / S. V. Kozlov, A. A. Shelkovaya, N. I. Denisova, E. S. Kozlov // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026;1(73): 77-83 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-77-83

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта №25-26-00115

Введение

Печень характеризуется сложным иммунорегуляторным микроокружением, которое постоянно подвергается воздействию пищевых антигенов, микробных метаболитов, экзогенных токсинов и бактериальных эндотоксинов (в частности, липополисахаридов), поступающих из кишечника через систему воротной вены. Выполняя функцию ключевого иммунного барьера, печень должна с высокой точностью распознавать, захватывать и выводить патогенные агенты, сохраняя при этом толерантность к безвредным антигенам [1].

Берберин — это изохинолиновый алкалоид, который получают из таких растений, как *Berberis aristata* и *Coptis chinensis*. Его широкое использование в традиционной медицине, например в Китае и Аюрведе обусловлено мощной антиоксидантной активностью, реализуемой через несколько механизмов. Во-первых, он усиливает действие природных защитных ферментов, включая супероксиддисмутазу (СОД), глутатионпероксидазу (ГПО) и каталазу (КАТ), которые нейтрализуют активные формы кислорода (АФК). Во-вторых, берберин активирует АМФ-активируемую протеинкиназу (АМРК), способствуя тем самым снижению выработки АФК в митохондриях и защищая клетки от окислительного повреждения [2]. В-третьих, он способен напрямую нейтрализовать свободные радикалы [3]. Отдавая электрон или атом водорода, берберин стабилизирует реактивные частицы, превращая их в менее реактивные или неактивные формы [3]. Это действие предотвращает запуск цепных реакций активными формами, которые могут привести к обширному повреждению клеток, включая перекисное окисление липидов, окисление белков и разрыв цепей ДНК [4], тем самым обеспечивая комплексный подход к снижению окислительного стресса при заболеваниях различной этиологии, сопровождаемых окислительным стрессом [5, 6].

Селен — незаменимый микроэлемент, играющий ключевую роль в поддержании окислительно-восстановительного гомеостаза благодаря включению в активный центр селено содержащих ферментов, таких как глутатионпероксидаза, тиоредоксинредуктаза и йодтиронин-дейодиназа. В последнее время особый интерес вызывают наночастицы селена (SeNPs), которые по сравнению с неорганическими и органическими формами селена обладают повышенной биодоступностью, сниженной токсичностью и выраженной антиоксидантной,

противовоспалительной и иммуномодулирующей активностью [7, 8].

Совместное применение берберина и наночастиц селена открывает перспективы для синергетического усиления их фармакологических эффектов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что комбинированное воздействие этих веществ приводит к более выраженному подавлению воспалительных цитокинов (TNF- α , IL-6), усилению экспрессии антиоксидантных ферментов и улучшению функционального состояния митохондрий. Кроме того, использование берберина в качестве стабилизатора при синтезе наночастиц селена позволяет получать биосовместимые нанокомпозиты с улучшенными фармакокинетическими характеристиками и целенаправленным действием на поражённые ткани [9].

Материалы и методы

Работа была проведена на базе кафедры «Болезни животных и ВСЭ» и ЦКП «Молекулярная биология» ФГБОУ ВО Вавиловского университета.

Эксперимент по изучению фармакотерапевтической активности исследуемого препарата BRB-nSe проводили на белых нелинейных мышах, из которых было сформировано 3 экспериментальные группы.

Для решения поставленной цели был разработан дизайн эксперимента, представленный в таблице 1.

Морфологические исследования крови проводили на гематологическом анализаторе MicroCC20vet, биохимический анализ крови проводили на биохимическом анализаторе StatFax3300. При биохимическом анализе крови определяли следующие показатели: АЛТ, АСТ, глюкоза, белок общий, альбумин. При оценке общего анализа крови особое внимание обращали на количество эритроцитов и лейкоцитов периферической крови, концентрацию гемоглобина и гематокритную величину.

Эвтаназию мышей осуществляли методом транслекции шейных позвонков, с использованием средств для наркоза (Изофлурана (PIRAMAL ENTERPRISES, Limited (Индия))).

Статистическую обработку полученных показателей проводили с использованием программы Microsoft Excel, достоверность различий между выборками оценивали по Стьюденту (ТТЕСТ).

Результаты

В ходе проведения эксперимента по изучению фармакотерапевтических свойств препарата BRB-nSe при рассмотрении на модели острого токсического

повреждения печени, вызванного сублетальными дозами CCl_4 , в первой группе мышей, которым терапия не проводилась, гибель за 7 суток эксперимента составила 50 %, во второй группе, мышам которой на следующие сутки после введения четыреххлористого углерода назначили испытуемый препарат BRB-nSe парентерально, в дозе 100 мг/кг по лекарственной форме 1 раз в день ежедневно на протяжении всего

опыта – 10 % и в третьей (интактной) группе признаков интоксикации и летальных исходов не зарегистрировано (табл. 2).

Через сутки после интоксикации тетрахлорметаном у животных отмечали гиподинамию, отказ от корма, нарушение груминга. У некоторых животных отмечали судороги, после которых они впадали в кому и далее наступала смерть.

Таблица 1. Дизайн эксперимента

1 группа контрольная (n=20)	2 группа опытная (n=20)	3 группа интактная (n=20)
День 0		
Введение трихлорметана на оливковом масле в соотношении 50:50, в объеме 1,22 мл/кг (LD50)	Введение трихлорметана на оливковом масле в соотношении 50:50, в объеме 1,22 мл/кг (LD50)	
День 1		
Клиническое исследование. Эвтаназия 10 голов для оценки лабораторных исследований крови. Определения концентрации восстановленного глутатиона в печени.	Клиническое исследование. Парентеральное ведение препарата BRB-nSe в дозе 100 мг/кг по лекарственной форме, 1 раз в день	Клиническое исследование. Эвтаназия 10 голов для оценки лабораторных исследований крови. Определения концентрации восстановленного глутатиона в печени.
День 2-6		
Клиническое исследование.	Клиническое исследование. Парентеральное ведение препарата BRB-nSe в дозе 100 мг/кг по лекарственной форме, 1 раз в день, ежедневно	Клиническое исследование.
День 7		
Клиническое исследование. Эвтаназия для оценки лабораторных исследований крови. Определения концентрации восстановленного глутатиона в печени.	Клиническое исследование. Эвтаназия для оценки лабораторных исследований крови. Определения концентрации восстановленного глутатиона в печени.	Клиническое исследование. Эвтаназия для оценки лабораторных исследований крови. Определения концентрации восстановленного глутатиона в печени.

Таблица 2. Показатели смертности и выживаемости белых нелинейных мышей при терапии экспериментального гепатита

№ Группы	Число мышей в опыте	Число погибших мышей, через (сутки)						Итоговый результат
		1	2	3	4	5	6	
1 (контрольные)	10	0	0	1	2	1	1	5/10
2 (опытные)	10	0	1	0	0	0	0	1/10
3 (интактные)	10	0	0	0	0	0	0	0/10

Таблица 3. Динамика биохимических показателей крови животных через 24 часа после введения 50 % раствора тетрахлорметана на оливковом масле в объеме 1,22 мл/кг

Показатель		АЛТ	АСТ	Глюкоза	Белок общий	Альбумин	Глобулин
Ед. изм		Е/л	Е/л	Ммоль/л	г/л	г/л	г/л
Группа 1 (n=10)	$M \pm m$	645 $\pm$ 107*	752 $\pm$ 114*	3,04 $\pm$ 0,81*	56,2 $\pm$ 7,8	31,8 $\pm$ 3,9	24,3 $\pm$ 6,12
Группа 3 (интактная) (n=10)	$M \pm m$	66 $\pm$ 19	195,7 $\pm$ 39	7,01 $\pm$ 1,91	63,8 $\pm$ 4,0	35,1 $\pm$ 2,8	28,7 $\pm$ 3,11

Примечание: * Различие по данному показателю статистически достоверно между опытной и интактной группами ($P \leq 0,05$)

Спустя сутки после начала эксперимента была проведена аспирация крови для гематологического анализа, по результатам которого было установлено достоверное повышение общего количества лейкоцитов у мышей с индуцированной тетрахлорметаном интоксикацией в 2,6 раза, по сравнению с контрольными животными (рис.1), что происходило из-за гранулоцитарных клеток, количество которых возросло более чем в 5,5 раза. Именно это подтвердило наличие развития воспалительных процессов в организме подопытных животных, в частности в печени, которая была поражена действием тетрахлорметана.

CCl_4 гепатотоксичное соединение, которое в результате окислительно-восстановительной реакции удаляет атомы галогена из микросом печени, образуя трихлорметильный радикал и его производное — трихлорметилпероксирадикал.

При анализе биохимических показателей сыворотки крови подопытных животных было установлено достоверное повышение аланинаминотрансферазы в 9 раз, аспартатаминотрансферазы более чем в 3 раза спустя 24 часа после введения 50 % раствора тетрахлорметана на оливковом масле относительно интактных мышей (табл. 3), в результате чего и

происходит выход цитоплазматических ферментов (к которым относятся и трансаминазы) в межклеточное пространство, откуда далее они эвакуируются в кровь, где происходит повышение их активности. Помимо этого отмечали резкое снижение концентрации глюкозы в сыворотке крови подопытных животных 2 раза до $3,04 \pm 0,8$ ммоль/л, относительно интактной группы мышей концентрация глюкозы в сыворотке которых составляла $7,01 \pm 1,91$ ммоль/л, что происходило вследствие повышения затрат энергии на компенсацию деструктивно-дегенеративных процессов в организме белых нелинейных мышей. При этом изменений белкового обмена через сутки после интоксикации выявлено не было.

Анализ концентрации восстановленного глутатиона в печени исследуемых животных через сутки после введения токсиканта показал достоверное его увеличение до $168,7 \pm 27,5$ мг/мл, что на 55 % выше, чем у интактной группы животных ($108,9 \pm 21,9$ мг/мл) (рис. 2). Повышение уровня глутатиона в печени на следующие сутки после введения тетрахлорметана в сублетальной дозе можно объяснить кратковременной повышенной экспрессией его в цитозоль гепатоцита как защитный механизм на действие патогенного фактора.

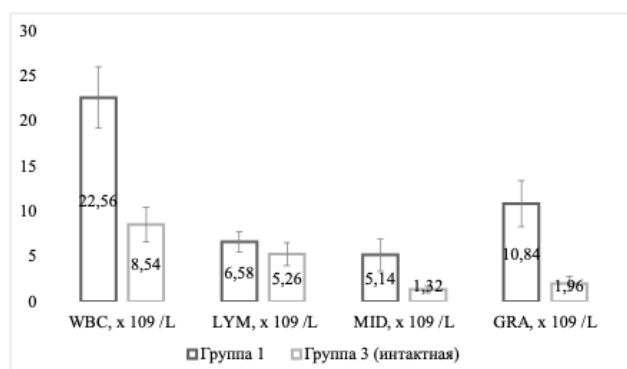


Рис. 1. Количество лейкоцитов в периферической крови мышей через 24 часа после введения тетрахлорметана

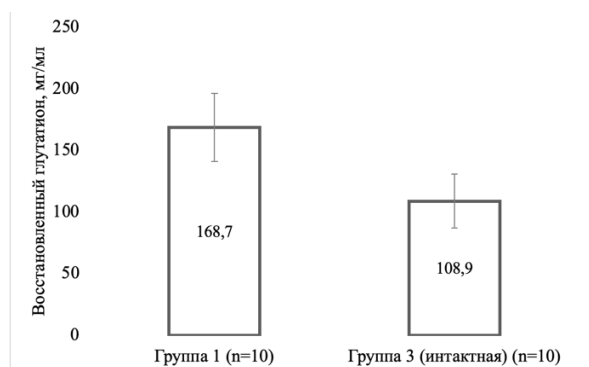


Рис. 2. Концентрация восстановленного глутатиона в печени мышей через 1 сутки после введения тетрахлорида метана

На момент окончания эксперимента был проведен анализ гематологических показателей, в

результате которого было выявлено достоверное снижение общего количества лейкоцитов у подопытных мышей первой опытной группы до $4,88 \pm 0,90 \times 10^9 / L$ в сравнении с показателями интактной группы, в которой данный показатель составил $9,21 \pm 2,16 \times 10^9 / L$.

Анализ показателей второй опытной группы мышей, которым наряду с введением CCl_4 в сублетальной дозе применяли парентерально исследуемый препарат BRB-nSe, количество лейкоцитов на 7 сутки составило $10,76 \pm 2,34 \times 10^9 / L$ и не имело достоверных отличий от интактной группы животных (рис. 3). Поэтому введение препарата BRB-nSe мышам способствовало купированию воспалительной реакции в печени, о чем свидетельствует восстановление количества лейкоцитов периферической крови до уровня интактных мышей.

При анализе биохимических показателей крови установлено достоверное снижение активности трансаминаз в сыворотке крови животных. Так, в первой опытной группе АЛТ снизилась до $93,6 \pm 6,8$ Е/л относительно первоначальных значений 645 ± 107 Е/л, но оставалась достоверно выше, чем в интактном контроле ($62,2 \pm 6,7$ Е/л). Вместе с этим во второй опытной группе мышей, которым назначали исследуемый препарат, активность фермента составила $48,7 \pm 7,3$ Е/л и не имеет достоверных отличий от контрольной группы. Также отмечается достоверное снижение АСТ как в первой, так и во второй группах животных относительно первоначальных значений. В первой группе до 264 ± 45 Е/л, во второй – 172 ± 31 Е/л, тогда как через сутки после интоксикации тетрахлорметаном активность данного фермента составляла 752 ± 114 Е/л. Вместе с этим в первой группе АСТ достоверно выше, чем в интактной, в то время, как во второй активность данной трансаминазы не отличается от интактной группы мышей.

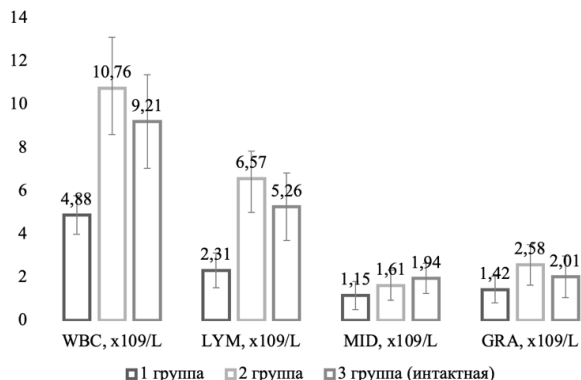
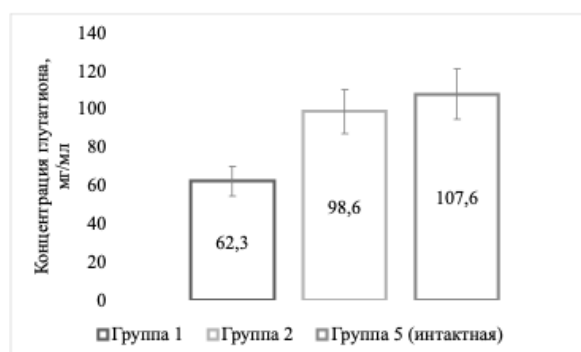
Наряду с этим применение BRB-nSe при индуцированном повреждении печени ксенобиотиком CCl_4 способствует восстановлению ее функциональной активности. Это подтверждается нормализацией альбуминсинтезирующей функции гепатоцитов, во второй опытной группе концентрация альбумина в сыворотке крови мышей к концу эксперимента составляет $42,3 \pm 2,7$ г/л, тогда как в первой группе $20,8 \pm 3,9$ г/л, что достоверно ниже, чем у интактных животных ($33,2 \pm 3,35$ г/л).

Концентрация глутатиона в печени животных первой опытной группы через 7 суток после начала эксперимента (рис. 4) составляет $62,3 \pm 16,3$ мг/мл, что достоверно ниже на 37 %, чем во второй опытной группе ($98,6 \pm 18,6$ мг/мл), мышам которой после интоксикации ксенобиотиком вводили испытуемый препарат ($P \leq 0,05$), в третьей интактной группе, концентрация которого составляет $107,6 \pm 21,4$ мг/мл ($P \leq 0,05$). Достоверная разница концентрации глутатиона в печени первой и третьей групп мышей отсутствует.

Таблица 4. Биохимические показатели сыворотки крови мышей через 7 суток после введения 50 % раствора тетрахлорметана на оливковом масле в объеме 1,22 мл/кг

Показатель	АЛТ, Е/л	АСТ, Е/л	Глюкоза, ммоль/л	Белок общий, г/л	Альбумин, г/л	Глобулин, г/л
Группа 1	93,6±6,8*	264±45*	5,2±1,6	68,2±6,1	20,8±3,9*	47,4±4,1*
Группа 2	48,7±7,3	172±31	6±3,78	86,2±9,2*	42,3±2,7*	43,9±3,7*
Группа 3 (интактная)	62,2±6,7	171±40	6,1±1,1	69,1±5,5	33,2±3,35	35,9±3,9

Примечание: * Различие по данному показателю статистически достоверно между опытной и интактной группами ($P \leq 0,05$ при t критическом 2,10)

**Рис. 3. Количество лейкоцитов периферической крови мышей через 7 суток после введения 50 % раствора тетрахлорида метана на оливковом масле в объеме 1,22 мл/кг****Рис. 4. Концентрация глутатиона в печени мышей через 7 суток после введения 50 % раствора тетрахлорметана на оливковом масле в объеме 1,22 мл/кг**

Рециркуляция глутатиона в печени животных, которым применяли препарат, содержащий берберин, конъюгированный с наночастицами селена на фоне тетрахлорметановой интоксикации, подтверждает синергическое воздействие на организм этих компонентов.

Результаты проведенных исследований наглядно показывают, что введение исследуемого препарата на основе берберина и наночастиц селена привело к восстановлению измененных параметров ферментов до контрольного уровня. Была показана защитная антиоксидантная роль исследуемого препарата против гепатотоксина.

Обсуждение

Тетрахлорид углерода CCl_4 , по результатам многочисленных исследований, является мощным гепатотоксином, вызывающим гистопатологические изменения, связанные с воспалительным или

окислительным стрессом и гибелью клеток [10, 11, 12, 13]. Вместе с этим достоверно доказано, что берберин обладает ярко выраженным противовоспалительным действием, которое основано на его способности подавлять сигнальный путь NF-κB – ключевой фактор транскрипции, регулирующий выработку и высвобождение различных воспалительных цитокинов [14, 15]

Используя классическую модель острого токсического повреждения печени тетрахлорметаном, многие авторы установили, как и в данном эксперименте, значительное повышение активности АСТ и АЛТ, что свидетельствует о развитии нарушения целостности мембран гепатоцитов и их органелл и выходе ферментов в межклеточную среду. Как утверждают в своих исследованиях Унсал В. и др. (2020), молекулярные механизмы повреждающего действия CCl_4 *in vivo* следует рассматривать с точки зрения следующих факторов: это во-первых связывание молекул ксенобиотиков с гидрофобными участками биомембран и во-вторых способностью метаболизировать ксенобиотики с участием специфической ферментной системы монооксигеназ эндоплазматического ретикулума с образованием высокореактивных метаболитов, которые взаимодействуют с биологическими структурами клеток [10].

Вместе с этим, как относительно недавно установлено исследователями, берберин оказывает прямое воздействие на клеточные мембраны и способен модулировать их проницаемость и функции ионного обмена. Прямое взаимодействие берберина с клеточными мембранами осуществляется посредством ингибирования активности Na^+/K^+-ATP азы в клеточной мембране. Это приводит к снижению ионной селективности и повышению проницаемости мембраны [14, 15]. Оказывает специфическое биоэлектрическое воздействие, которое влияет на потенциал клеточной мембраны и, как следствие, на распределение ионов внутри и вне клетки [16], напрямую связывается с фосфолипидами в клеточной мембране, изменяя их конформацию, что приводит к повышению ее стабильности [17]. Это объясняет снижение активности цитолитических ферментов печени при применении испытуемого препарата, содержащего берберин.

Данный факт указывает на то, что берберин, входящий в состав препарата, стимулирует сигнальный путь АМРК (5'-аденозинмонофосфат-активируемая протеинкиназа), который является ключевым регулятором клеточного энергетического гомеостаза и окислительного стресса [10]. АМРК функционирует

как датчик энергии, поддерживая баланс клеточной энергии за счёт катаболических путей, генерирующих АТФ, и подавляя анаболические пути, потребляющие АТФ [18]. Активация АМРК берберинном приводит к ингибированию НАДФН-оксидазы — ферментного комплекса, участвующего в выработке активных форм кислорода (АФК) [18].

Кроме того, активация АМРК усиливает экспрессию митохондриального белка, который снижает выработку АФК в митохондриях за счёт рассеивания протонного градиента через митохондриальную мембрану [18]. Такое снижение выработки АФК в митохондриях дополнительно способствует общему снижению окислительного стресса в клетке [18].

Заключение

Экспериментальные данные подтвердили наличие выраженного гепатопротекторного эффекта у разрабатываемого фармакологического средства в условиях острого токсического поражения печени, вызванного воздействием тетрахлорметана.

Достоверно установлено, что берберин, конъюгированный с наночастицами селена при парентеральном введении в дозе 100 мг/кг 1 раз в день в течение 7 дней, способствует купированию воспалительного процесса в печени, вызванного воздействием четыреххлористого углерода, стабилизации клеточных мембран гепатоцитов, на что указывает снижение активности трансаминаз в сыворотке крови животных, а также восстановлению функциональной активности печени, о чем свидетельствует повышение белка и его фракций в сыворотке крови.

Литература

1. Anti-inflammatory, antioxidant, and immunomodulatory effects of Berberis vulgaris and its constituent berberine, experimental and clinical, a review / F. Shakeri, S. Kiani, G. Rahimi, et al // *Phytother Res*. 2024 Vol. 38 No. 4. P. 1882-1902. doi: 10.1002/ptr.8077
2. Efficacy Evaluation of Berberis Aristata and Silybum Marianum Fixed Dose Combination on Glycaemic and Insulin Resistance Parameters in Adult Population: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials / V. Dubey, J. Kansagra, V. Sureja, et al. // *Future J. Pharm. Sci*. 2024 Vol. 10 No. 28 P. 1-14. doi:10.1186/s43094-024-00603-7
3. Oxidative Stress, Free Radicals and Antioxidants: Potential Crosstalk in the Pathophysiology of Human Diseases / P. Chaudhary, P. Janmeda, A.O. Docea, et al. // *Front. Chem*. 2023 Vol. 10 P. 1158198. doi: 10.3389/fchem.2023.1158198
4. The Chemistry of Reactive Oxygen Species (ROS) Revisited: Outlining Their Role in Biological Macromolecules (DNA, Lipids and Proteins) and Induced Pathologies / C. A. Juan, J. M. P. de la Lastra, F.J. Plou, et al // *Int. J. Mol. Sci*. 2021 Vol. 22 No. 9 P. 4642. doi: 10.3390/ijms22094642.
5. Tian E., Sharma G., Dai C. Neuroprotective Properties of Berberine: Molecular Mechanisms and Clinical Implications // *Antioxidants*. 2023 Vol. 12 No. 10 P. 1883. doi: 10.3390/antiox12101883.
6. Оптимизация методов выделения и идентификации пептидов, выделенных из личинок *Hermetia illucens* / О. С. Ларионова, Я. Б. Древко, Н. Д. Тычинин, и др. // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика* 2024 Т. 24 № 2 С. 150-160 doi:10.18500/1817-3020-2024-24-2-150-160.
7. Varlamova E. G. Molecular Mechanisms of the Therapeutic Effect of Selenium Nanoparticles in Hepatocellular Carcinoma. *Cells*. 2024 Vol. 13. No. 13 P. 1102. doi: 10.3390/cells13131102.
8. Патент № 2794958 С2 Российская Федерация, МПК А61К 35/64, А61К 36/835, А61Р 17/02. Композиция ранозаживляющего действия: № 2021118049: заявл. 22.06.2021: опубл. 26.04.2023 / О. С. Ларионова, Я. Б. Древко, К. Ю. Смирнова и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова".
9. Co-Encapsulation of Berberine and Piperine in Coaxial Electrosprayed Chitosan Nanoparticles for Sustained Release and Improved Berberine Bioavailability / N. H. Cao-Luu, V. T. Luong-Huynh, B. T. Nguyen-Thi, et al. // *Chem. Pap*. 2024. Vol. 78. P.4211–4223 doi: 10.21203/rs.3.rs-3302803/v1
10. Unsal V, Cicek M, Sabancilar İ. Toxicity of carbon tetrachloride, free radicals and role of antioxidants // *Rev Environ Health*. 2020 Vol. 36 No. 2. P. 279-295. doi: 10.1515/reveh-2020-0048
11. Manibusan M.K., Odin M., Eastmond D.A. Postulated carbon tetrachloride mode of action: a review// *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev*. 2007 Vol. 25. No. 3. P. 185-209. doi: 10.1080/10590500701569398
12. Differential recruitment of monocyte-derived macrophages in control and stellate cell-depleted mice during recurrent carbon tetrachloride-induced acute liver injury / A. Sharma, R. Kudira, J. Wang, et al // *J Cell Physiol*. 2022 Vol. 237. No. 11. P. 4215-4225. doi: 10.1002/jcp.30877
13. Protective Effects of Naringenin from Citrus sinensis (var. Valencia) Peels against CCl4-Induced Hepatic and Renal Injuries in Rats Assessed by Metabolomics, Histological and Biochemical Analyses / N. M. Ammar, H. A. Hassan, H. M. I. Abdallah, et al. // *Nutrients*. 2022. Vol. 14 No. 4 P. 841. doi: 10.3390/nu14040841
14. Berberine may provide redox homeostasis during aging in rats / A.K. Yadawa, P. Srivastava, A. Singh, et al. // *Z Naturforsch C J. Biosci*. 2023 Vol. 78. No. 7-8. P. 307-315. doi: 10.1515/znc-2022-0213
15. Investigation of dose-dependent effects of berberine against renal ischemia/reperfusion injury in experimental diabetic rats / M. Kumas, M. Esrefoglu, E. Karatas, et al // *Nefrologia (Engl Ed)*. 2019. Vol. 39. No. 4. P. 411-423. doi: 10.1016/j.nefro.2018.10.006
16. Tang Berberine regulates mesangial cell proliferation and cell cycle to attenuate diabetic nephropathy

through the PI3K/Akt/AS160/GLUT1 signaling pathway / W.J. Ni, X.M. Guan, J. Zeng, et al // J. Cell. Mol. Med. 2022 Vol. 26.No. 4. P. 1144-1155 doi: 10.1111/jcmm.17167

17. The pharmacological activity of berberine, a review for liver protection / Z. Mengting, D. Ying, L. Meichen, et al. // European Journal of Pharmacology. 2021. Vol. 890. P. 173655. doi: 10.3390/molecules26051327

18. Berberine alleviates acute lung injury in septic mice by modulating Treg/Th17 homeostasis and down-regulating NF-KB signaling Drug / L.W. Chen, X.Y. Liu, X.T. Wang, et al. // Des. Devel. Ther. 2023. Vol. 13. No. 17. P. 1139-1151. doi: 10.2147/DDDT.S401293

References

1. Anti-inflammatory, antioxidant, and immunomodulatory effects of Berberis vulgaris and its constituent berberine, experimental and clinical, a review / F. Shakeri, S. Kiani, G. Rahimi, et al // Phytother Res. 2024 Vol. 38. No. 4. P. 1882-1902. doi: 10.1002/ptr.8077

2. Efficacy Evaluation of Berberis Aristata and Silybum Marianum Fixed Dose Combination on Glycaemic and Insulin Resistance Parameters in Adult Population: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials / V. Dubey, J. Kansagra, V. Sureja, et al. // Future J. Pharm. Sci. 2024 Vol. 10. No. 28. P. 1-14 doi:10.1186/s43094-024-00603-7

3. Oxidative Stress, Free Radicals and Antioxidants: Potential Crosstalk in the Pathophysiology of Human Diseases / P. Chaudhary, P. Janmeda, A.O. Docea, et al. // Front. Chem. 2023. Vol. 10. P. 1158198. doi: 10.3389/fchem.2023.1158198

4. The Chemistry of Reactive Oxygen Species (ROS) Revisited: Outlining Their Role in Biological Macromolecules (DNA, Lipids and Proteins) and Induced Pathologies / C. A. Juan, J. M. P. de la Lastra, F.J. Plou, et al // Int. J. Mol. Sci. 2021 Vol. 22. No. 9. P. 4642. doi: 10.3390/ijms22094642.

5. Tian E., Sharma G., Dai C. Neuroprotective Properties of Berberine: Molecular Mechanisms and Clinical Implications // Antioxidants. 2023 Vol. 12 No. 10 P. 1883. doi: 10.3390/antiox12101883

6. Optimization of methods for the extraction and identification of peptides isolated from Hermetia illucens larvae / O. S. Larionova, Ya. B. Drevko, N. D. Tychinin, et al. // Bulletin of the Saratov University. New series. Series: Physics 2024. Vol. 24 No. 2. P. 150-160 doi:10.18500/1817-3020-2024-24-2-150-160

7. Varlamova E. G. Molecular Mechanisms of the Therapeutic Effect of Selenium Nanoparticles in Hepatocellular Carcinoma. Cells. 2024 Vol. 13. No. 13 P. 1102. doi: 10.3390/cells13131102

8. Patent No. 2794958 C2 Russian Federation, IPC A61K 35/64, A61K 36/835, A61P 17/02. Wound-healing composition: No. 2021118049: declared 06/22/2021: published 04/26/2023 / O. S. Larionova, Ya. B. Drevko, K.

Yu. Smirnova et al.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov".

9. Co-Encapsulation of Berberine and Piperine in Coaxial Electrosprayed Chitosan Nanoparticles for Sustained Release and Improved Berberine Bioavailability / N. H. Cao-Luu, V. T. Luong-Huynh, B. T. Nguyen-Thi, et al. // Chem. Pap. 2024 Vol. 78 P.4211-4223. doi: 10.21203/rs.3.rs-3302803/v1

10. Unsal V, Cicek M, Sabancilar İ. Toxicity of carbon tetrachloride, free radicals and role of antioxidants // Rev Environ Health. 2020 Vol. 36 No. 2 P. 279-295. doi: 10.1515/reveh-2020-0048

11. Manibusan M.K., Odin M., Eastmond D.A. Postulated carbon tetrachloride mode of action: a review// J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev. 2007 Vol. 25. No. 3. P. 185-209. doi: 10.1080/10590500701569398

12. Differential recruitment of monocyte-derived macrophages in control and stellate cell-depleted mice during recurrent carbon tetrachloride-induced acute liver injury / A. Sharma, R. Kudira, J. Wang, et al // J Cell Physiol. 2022 Vol. 237. No. 11. P. 4215-4225. doi: 10.1002/jcp.30877

13. Protective Effects of Naringenin from Citrus sinensis (var. Valencia) Peels against CCl4-Induced Hepatic and Renal Injuries in Rats Assessed by Metabolomics, Histological and Biochemical Analyses / N. M. Ammar, H. A. Hassan, H. M. I. Abdallah, et al. // Nutrients. 2022. Vol. 14 No. 4 P. 841. doi: 10.3390/nu14040841

14. Berberine may provide redox homeostasis during aging in rats / A.K. Yadawa, P. Srivastava, A. Singh, et al. // Z Naturforsch C J. Biosci. 2023 Vol. 78 No. 7-8. P. 307-315 doi: 10.1515/znc-2022-0213

15. Investigation of dose-dependent effects of berberine against renal ischemia/reperfusion injury in experimental diabetic rats / M. Kumas, M. Esrefoglu, E. Karatas, et al // Nefrologia (Engl Ed). 2019. Vol. 39. No. 4. P. 411-423 doi: 10.1016/j.nefro.2018.10.006

16. Tang Berberine regulates mesangial cell proliferation and cell cycle to attenuate diabetic nephropathy through the PI3K/Akt/AS160/GLUT1 signaling pathway / W.J. Ni, X.M. Guan, J. Zeng, et al // J. Cell. Mol. Med. 2022 Vol. 26.No. 4 P. 1144-1155 doi: 10.1111/jcmm.17167

17. The pharmacological activity of berberine, a review for liver protection / Z. Mengting, D. Ying, L. Meichen, et al // European Journal of Pharmacology. 2021. Vol. 890. P. 173655. doi: 10.3390/molecules26051327

18. Berberine alleviates acute lung injury in septic mice by modulating Treg/Th17 homeostasis and down-regulating NF-KB signaling Drug / L.W. Chen, X.Y. Liu, X.T. Wang, et al. // Des. Devel. Ther. 2023. Vol. 13. No. 17. P. 1139-1151. doi: 10.2147/DDDT.S401293

Исследование гематологических индексов у больных эндокардиозом собак

А. А. Руденко[✉], доктор ветеринарных наук, профессор кафедры «Ветеринарная медицина»

П. С. Никольская, студент Института ветеринарии, ветсанэкспертизы и агробезопасности

В. И. Луцай, доктор ветеринарных наук, заведующий кафедрой «Ветеринарная медицина»

ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»

125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11.

[✉]vetrudek@yandex.ru

Резюме. В статье приведены данные анализа гематологических индексов интоксикации у собак с эндокардиозом митрального клапана. Цель работы: изучить гематологические индексы интоксикации при эндокардиозе митрального клапана. Проведено сравнительное исследование с участием 105 собак с эндокардиозом, распределенных по функциональным классам сердечной недостаточности (I–IV), и 24 клинически здоровых животных (контрольная группа). Методами непараметрической статистики (критерий Манна-Уитни) были проанализированы восемь расчетных лейкоцитарных индексов: лейкоцитарный индекс (ЛИ), индекс Кребса (ИК), лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс (ИЛГ), индекс соотношения лейкоцитов и СОЭ (ИЛСОЭ), ядерный индекс Г.Д. Даштаянца (ЯИ), лейкоцитарный индекс интоксикации по Островскому В.К. (ЛИИ), индекс сдвига лейкоцитов крови (ИСЛК) и индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов (ИСНМ). Проведен корреляционный анализ для оценки связи между индексами и тяжестью сердечной недостаточности. Установлено достоверное изменение шести из восьми исследуемых индексов у больных животных по сравнению с контрольной группой. Выявлен комплекс нарушений, свидетельствующий о развитии синдрома эндогенной интоксикации и системного воспаления. Наиболее выраженные изменения (пик нарушений) выявлены при II и III функциональных классах сердечной недостаточности: ядерный индекс (ЯИ) повышен на 214 %, индекс Кребса (ИК) – на 140 %. Индекс ИЛСОЭ прогрессивно нарастал с увеличением тяжести патологии, показав максимальное значение при IV функциональном классе (+70 %) и наиболее сильную положительную корреляцию с тяжестью сердечной недостаточности ($r=0,36$). Индексы ИСЛМ и ИСНМ выявились неинформативными. Гематологические индексы интоксикации, в особенности ЯИ, ИК и ИЛСОЭ, являются чувствительными маркерами синдрома эндогенной интоксикации и системного воспаления у собак с эндокардиозом. Динамика этих индексов коррелирует с тяжестью сердечной недостаточности, что позволяет рассматривать их как потенциальные критерии для мониторинга течения заболевания и оценки прогноза.

Ключевые слова: собака, эндокардиоз, хроническая сердечная недостаточность, гематологические индексы, интоксикация, системное воспаление, лейкоцитарные индексы.

Для цитирования: Руденко А.А., Никольская П.С., Луцай В.И. Исследование гематологических индексов у собак с эндокардиозом // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 84–90. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-84-90

Благодарности: Исследование выполнено при консультативной поддержке академика РАН, доктора ветеринарных наук, профессора Уша Бориса Вениаминовича

Study of hematological indices in dogs with endocardiosis

A.A. Rudenko^{1✉}, P.S. Nikolskaya¹, V.I. Lutsay¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)",

125080, Moscow, Volokolamskoye Shosse, 11.

[✉]vetrudek@yandex.ru

Abstract. The article presents data from the analysis of hematological indices of intoxication in dogs with mitral valve endocardiosis. The aim of the study was to investigate the hematological indices of intoxication in mitral valve endocardiosis. Methods: A comparative study was conducted involving 105 dogs with endocardiosis, distributed according to functional classes of heart failure (I–IV), and 24 clinically healthy animals (control group). Eight leukocyte indices (LI, KI, HGI, ESR Index, NI, LII, SLLI, SNMI) were analyzed using non-parametric statistics (Mann-Whitney U test). A correlation analysis was performed to assess the relationship between the indices and the severity of heart failure. A significant change in six out of the eight studied indices was established in sick animals compared to the control group. A complex of disorders indicating the development of endogenous intoxication syndrome and systemic inflammation was identified. The most pronounced changes (peak of disturbances) were detected in functional class II and III heart failure: the Nuclear Index (NI) increased by 214%, and the Krebs Index (KI) by 140%. The ESR Index progressively increased with the severity of the pathology, showing the maximum value in functional class IV (+70%) and the strongest positive correlation with the severity of heart failure ($r=0.36$). The SLLI and SNMI indices were found to be uninformative. Hematological indices of intoxication, particularly NI, KI, and the ESR Index, are sensitive markers of endogenous intoxication syndrome and systemic inflammation in dogs with

endocardiosis. The dynamics of these indices correlate with the severity of heart failure, which allows them to be considered as potential criteria for monitoring the disease course and assessing prognosis.

Keywords: dog, endocardiosis, chronic heart failure, hematological indices, intoxication, systemic inflammation, leukocyte indices.

For citation: Rudenko A.A., Nikolskaya P.S., Lutsay V.I. Study of Hematological Indices in Dogs with Endocardiosis // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026;1(73): 84-90 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-84-90

Введение

Эндокардиоз митрального клапана у собак – это наиболее часто встречающееся заболевание сердца, которое нередко сопровождается застойной сердечной недостаточностью и может негативно влиять как на продолжительность, так и на качество жизни животных [1, 2]. У собак мелких пород частота этой патологии может достигать 40 % [3, 4]. Эндокардиоз у собак проявляется хроническим миксоматозным изменением митрального клапана (а иногда и трикуспидального клапана), что приводит к утолщению и недостаточному смыканию створок атриовентрикулярных клапанов сердца, а также вызывает феномен митральной и/или трикуспидальной недостаточности [5, 6, 7]. Патогенез данного заболевания детально изучен (деформация клапана, регургитация, дилатация камер сердца, застойные явления в легких, вторичные поражения внутренних органов, воспаление) [8, 9, 10], однако гематологические индексы интоксикации [11, 12, 13] не рассматривались как диагностические и прогностические маркеры в мировой научной литературе, поэтому мы поставили цель их детально исследовать.

Цель работы – изучить гематологические индексы интоксикации при эндокардиозе митрального клапана.

Материалы и методы

Работа проведена на кафедре ветеринарной медицины ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», клиниках ветеринарной медицины «Эпиона» (г. Москва), «В мире с животными» (г. Серпухов) в течение 2018-2025 гг. Комплексным методом использовали данные анамнеза, клинической картины, эхокардиографии. В исследование вошли группы животных: клинически здоровые (нулевая группа, n=24) и больные эндокардиозом митрального клапана (n=24). Диагностику эндокардиоза атриовентрикулярных клапанов у собак проводили по стандартной методике [5, 8]. Проводили обязательную верификацию характерных эхокардиографических структурно-функциональных изменений створок атриовентрикулярных клапанов. Использовали критерии Нью-Йоркской ассоциации кардиологов NYHA [3], модифицированной для животных, больных эндокардиозом атриовентрикулярных клапанов сердца.

Лейкоцитарные индексы определяли по формулам [10, 12–14]:

$$ЛИ = \frac{Л}{(П+С)} \quad (1)$$

$$ИК = \frac{(П+С)}{Л} \quad (2)$$

$$ИЛГ = \frac{(Л \cdot 10)}{(М+Ю+П+С+Э+Б)} \quad (3)$$

$$ИЛСОЭ = \frac{WBC \times COЭ}{100} \quad (4)$$

$$ЯИ = \frac{(М+Ю+П)}{С} \quad (5)$$

$$ЛИИ = \frac{(П+С)}{(Л+Э+М)} \quad (6)$$

$$ИСЛК = \frac{(Э+Б+П+С)}{(М+Л)} \quad (7)$$

$$ИСНМ = \frac{(П+С)}{М} \quad (8)$$

где ЛИ – лейкоцитарный индекс, Л – лимфоциты, П – палочкоядерные нейтрофилы, С – сегментоядерные нейтрофилы, ИК – индекс Кребса, ИЛГ – лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс, М – моноциты, Ю – нейтрофильные метамиелоциты, П – палочкоядерные нейтрофилы, С – сегментоядерные нейтрофилы, Э – эозинофилы, Б – базофилы, ИЛСОЭ – индекс соотношения лейкоцитов и СОЭ, WBC – общее количество лейкоцитов, ЯИ – ядерный индекс Г.Д. Даштаянца, ЛИИ – лейкоцитарный индекс интоксикации по Островскому В.К., ИСЛК – индекс сдвига лейкоцитов крови, ИСНМ – индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов.

Цифровые данные подвергли статистическому анализу с помощью программы Statistica 7 [5]. Изучали следующие статистические показатели: среднее арифметическое (М, Mean), доверительный интервал (минимальный доверительный интервал CI-95 % и максимальный доверительный интервал CI+95%). Также определяли стандартное отклонение (Standard Deviation – Std. Dev. или σ).

Результаты

В исследование включены 105 собак, больных эндокардиозом, с проявлениями хронической сердечно-сосудистой недостаточности I (n=33), II (n=35), III (n=28) и IV (n=9) функционального класса. Цифровые данные об изменении гематологических показателей представлены в таблице 1.

Анализ гематологических индексов у собак с эндокардиозом выявил ряд статистически значимых изменений по сравнению с клинически здоровыми животными (табл. 1). Статистический анализ с использованием критерия Манна-Уитни показал достоверные различия по шести из девяти исследованных индексов. Не выявлено значимых изменений в показателях ИЛСОЭ, ИСЛМ и ИСНМ. При этом наиболее выраженные изменения отмечены в следующих индексах: ядерный индекс (ЯИ) Г.Д. Даштаянца продемонстрировал наибольший прирост – на 157 %

4.2.1. Патология животных, морфология, физиология, фармакология и токсикология (ветеринарные науки)

($p \leq 0,001$); индекс Кребса (ИК) увеличился на 117 % ($p \leq 0,01$); лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ) по Островскому В.К. возрос на 95 % ($p \leq 0,05$); индекс сдвига лейкоцитов (ИСЛК) повысился на 60 % ($p \leq 0,05$).

В то же время было зафиксировано значимое снижение двух индексов: лимфоцитарный индекс (ЛИ) уменьшился на 28 % ($p \leq 0,01$); индекс лимфоцитов/гранулоцитов (ИЛГ) снизился на 30 % ($p \leq 0,01$).

Комплекс выявленных изменений, в частности значительное повышение индексов интоксикации (ЛИИ, ЯИ) и воспаления (ИСЛК) на фоне снижения

лимфоцитарных индексов (ЛИ, ИЛГ) может свидетельствовать о наличии синдрома эндогенной интоксикации и иммунновоспалительного синдрома у собак с эндокардиозом. Данные нарушения могут способствовать прогрессированию сердечной недостаточности и ухудшению общего состояния животных.

Детальное исследование собак с эндокардиозом и различными функциональными классами хронической сердечной недостаточности выявило достоверные изменения гематологических индексов, которые представлены в таблице 2.

Таблица 1. Изменения гематологических индексов у больных эндокардиозом собак

Показатель	Биометрический показатель	Кл. здоровые (n=24)	Эндокардиоз (n=105)
ЛИ, усл. ед.	M±SD	0,43±0,25	0,31±0,27**
	95% CI	0,33-0,54	0,26-0,37
ИК, усл. ед.	M±SD	3,36±2,88	7,29±11,01**
	95% CI	2,15-4,58	5,16-9,42
ИЛГ, усл. ед.	M±SD	4,02±2,32	2,81±2,40**
	95% CI	3,04-5,00	2,34-3,27
ИЛСОЭ, усл. ед.	M±SD	0,10±0,02	0,12±0,05
	95% CI	0,09-0,11	0,11-0,13
ИСЛМ, усл. ед.	M±SD	13,40±15,24	5,29±6,53
	95% CI	6,96-19,83	4,03-6,56
ИСНМ, усл. ед.	M±SD	34,35±33,00	23,59±25,05
	95% CI	20,42-48,28	18,74-28,44
ИСЛК, усл. ед.	M±SD	3,19±2,25	5,10±4,72*
	95% CI	2,24-4,14	4,18-6,01
ЯИ, усл. ед.	M±SD	0,14±0,10	0,36±0,43***
	95% CI	0,09-0,18	0,27-0,44
ЛИИ, усл. ед.	M±SD	2,75±2,17	4,48±4,67*
	95% CI	1,83-3,66	3,57-5,38

Примечание: * ($p \leq 0,05$); ** ($p \leq 0,01$); *** ($p \leq 0,001$) – уровень статистической значимости параметров собак, больных эндокардиозом, по сравнению клинически здоровыми (критерий Манна-Уитни)

Таблица 2. Изменения гематологических индексов у больных эндокардиозом собак, в зависимости от функциональных классов сердечной недостаточности

Показатель	Биометрический показатель	Кл. здоровые (n=24)	Больные эндокардиозом собаки, разных функциональных классов сердечной недостаточности			
			I (n=33)	II (n=35)	III (n=28)	IV (n=9)
ЛИ, усл. ед.	M±SD	0,43±0,25	0,39±0,36	0,26±0,19**	0,29±0,21	0,30±0,22
	95% CI	0,33...0,54	0,27...0,52	0,19...0,32	0,21...0,37	0,31...0,47
ИК, усл. ед.	M±SD	3,36±2,88	5,25±5,59	8,05±9,19**	9,65±17,58	4,22±1,54
	95% CI	2,15...4,58	3,27...7,23	4,90...11,21	2,84...16,47	3,03...5,40
ИЛГ, усл. ед.	M±SD	4,02±2,32	3,58±3,27	2,32±1,72**	2,63±2,00*	2,61±1,60
	95% CI	3,04...5,00	2,42...4,74	1,73...2,91	1,86...3,40	1,38...3,84
ИЛСОЭ, усл. ед.	M±SD	0,10±0,02	0,10±0,03	0,12±0,05	0,13±0,06	0,17±0,06**
	95% CI	0,09...0,11	0,09...0,11	0,11...0,14	0,11...0,15	0,12...0,22
ИСЛМ, усл. ед.	M±SD	13,40±15,24	5,11±5,37	5,69±7,96	4,92±7,29	6,68±5,60
	95% CI	6,96-19,83	3,21...7,02	2,96...8,43	2,09...7,74	2,37...10,98
ИСНМ, усл. ед.	M±SD	34,35±33,00	23,19±25,86	24,75±24,34	21,42±26,29	24,97±19,08
	95% CI	20,42...48,28	14,03...32,36	16,39...33,11	11,23...31,62	10,30...39,64
ИСЛК, усл. ед.	M±SD	3,19±2,25	4,25±3,62	5,64±5,68*	5,75±5,21	3,83±1,30
	95% CI	2,24...4,14	2,97...5,54	3,69...7,59	3,73...7,77	2,84...4,82
ЯИ, усл. ед.	M±SD	0,14±0,10	0,29±0,18***	0,44±0,51***	0,38±0,57***	0,25±0,16**
	95% CI	0,09...0,18	0,22...0,35	0,27...0,62	0,16...0,60	0,13...0,37
ЛИИ, усл. ед.	M±SD	2,75±2,17	3,86±3,52	4,97±5,55*	4,94±5,37	3,07±1,21
	95% CI	1,83...3,66	2,62...5,11	3,06...6,87	2,86...7,02	2,14...4,00

Примечание: * ($p \leq 0,05$); ** ($p \leq 0,01$); *** ($p \leq 0,001$) – уровень статистической значимости параметров собак, больных эндокардиозом, по сравнению с клинически здоровыми животными (критерий Манна-Уитни)

Анализ гематологических индексов в зависимости от функционального класса хронической сердечной недостаточности выявил четкую тенденцию к усугублению нарушений по мере прогрессирования заболевания (табл. 2). Как и в предыдущем анализе, индексы ИСЛМ и ИСНМ не показали статистически значимых изменений, подтверждая их низкую диагностическую ценность при эндокардиозе. Одновременно с этим, ключевые изменения среди статистически значимых индексов включают ряд важных моментов. Во-первых, наиболее выраженная динамика наблюдалась у Ядерного индекса (ЯИ): его значение было достоверно выше ($p \leq 0,001$) у животных всех функциональных классов сердечной недостаточности по сравнению со здоровыми, достигнув максимума при II функциональном классе (+214 %). Это может указывать на пиковые особенности формирования истощения компенсаторных возможностей организма на данной стадии болезни [11, 15].

Во-вторых, индекс Кребса (ИК) был значимо повышен ($p \leq 0,01$) при II функциональном классе сердечной недостаточности (+140 %), что свидетельствует о серьезных метаболических нарушениях и, вероятно, накоплении токсичных продуктов обмена. В-третьих, индекс лимфоцитов/гранулоцитов (ИЛГ) был достоверно снижен на 34,6 % ($p \leq 0,01$) при II функционального класса сердечной недостаточности, отражая угнетение иммунного ответа. При этом, индекс скорости оседания эритроцитов (ИЛСОЭ) прогрессивно увеличивался с ростом функционального класса сердечной недостаточности, достигнув максимального значения в IV группе животных (+70 %, $p \leq 0,01$), что четко коррелирует с нарастанием воспалительного процесса и тяжести патологического состояния. Лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ) и индекс сдвига лейкоцитов (ИСЛК) были значимо повышены при II и III функциональном классе (на 76...81 %, $p \leq 0,05$), однако снижались при IV, что может говорить об истощении иммунной системы на терминальной стадии болезни.

Полученные данные демонстрируют, что гематологические индексы, в особенности ЯИ, ИК и ИЛСОЭ чувствительны к степени тяжести сердечной недостаточности у собак при эндокардиозе. Наиболее выраженные метаболические и иммунные нарушения наблюдаются при II и III функциональных классах хронической сердечной недостаточности. Динамика этих индексов может иметь прогностическое значение и использоваться для мониторинга течения заболевания и эффективности проводимой терапии.

Результаты корреляционного анализа взаимосвязи гематологических индексов с функциональным классом хронической сердечной недостаточности представлены в таблице 3.

Таблица 3. Корреляция между гематологическими индексами и функциональным классом хронической сердечной недостаточности у собак при эндокардиозе

Показатель	Коэффициент корреляции (r)	Уровень статистической значимости
ЛИ	-0,20	$p \leq 0,05$
ИК	0,15	НД
ИЛГ	-0,22	$p \leq 0,05$
ИЛСОЭ	0,36	$p \leq 0,05$
ИСЛМ	-0,21	$p \leq 0,05$
ИСНМ	-0,12	НД
ИСЛК	0,15	НД
ЯИ	0,18	$p \leq 0,05$
ЛИИ	0,11	НД

Примечание: НД – нет достоверных отличий.

Корреляционный анализ выявил наличие статистически значимых, но в целом слабых корреляционных связей. Наиболее выраженная прямая зависимость отмечена для индекса ИЛСОЭ ($r=0,36$; $p \leq 0,05$), что свидетельствует о четкой тенденции к нарастанию воспалительного процесса по мере прогрессирования синдрома хронической сердечной недостаточности у больных эндокардиозом собак. При этом достоверные отрицательные корреляции очень слабой силы зафиксированы для следующих показателей: ЛИ ($r=-0,20$; $p \leq 0,05$); ИЛГ ($r=-0,22$; $p \leq 0,05$) и ИСЛМ ($r=-0,21$; $p \leq 0,05$). Эта тенденция указывает на постепенное снижение значений данных индексов при увеличении функционального класса сердечной недостаточности. Очень слабая прямая корреляция выявлена в отношении Ядерного индекса (ЯИ) ($r=0,18$; $p \leq 0,05$). Следует отметить, что такие показатели, как ИК, ИСНМ, ИСЛК и ЛИИ не продемонстрировали статистически значимой линейной зависимости от функционального класса сердечной недостаточности.

Несмотря на слабую силу выявленных связей, полученные данные позволяют выделить ИЛСОЭ в качестве наиболее чувствительного маркера, ассоциированного с прогрессированием сердечной недостаточности. Совокупность результатов (снижение ЛИ и ИЛГ, рост ИЛСОЭ и ЯИ) подтверждает наличие у собак с эндокардиозом синдрома системного воспаления и эндогенной интоксикации, степень выраженности которых имеет тенденцию к увеличению с тяжестью сердечной недостаточности.

Расчет гематологических индексов интоксикации является информативным, относительно простым и доступным методом, дополняющим стандартное обследование собак с эндокардиозом. Их использование в клинической практике может способствовать более раннему выявлению синдрома эндогенной интоксикации, объективной оценке тяжести состояния животного и мониторингу эффективности проводимой терапии. Перспективы дальнейших исследований видятся в изучении динамики данных индексов на фоне стандартного кардиологического лечения, а также в проведении более масштабных многофакторных исследований для установления

точных пороговых значений и интеграции расчета этих показателей в комплексные прогностические шкалы. Для установления более точных прогностических и диагностических критериев требуются дальнейшие исследования с включением большего количества животных и применением многофакторных моделей анализа.

Обсуждение

Проведенное исследование продемонстрировало, что у собак с эндокардиозом митрального клапана формируется комплекс гематологических нарушений, характерных для синдрома эндогенной интоксикации и системного воспаления, что согласуется с современными представлениями о патогенезе хронической сердечной недостаточности как о состоянии, сопровождающемся иммуновоспалительной активацией [1, 2, 8]. Полученные нами данные о достоверном повышении индексов, отражающих интоксикацию (ядерный индекс Г.Д. Даштаянца, индекс Кребса, лейкоцитарный индекс интоксикации по Островскому), причем с максимальными значениями на стадиях II–III функциональных классов, указывают на то, что именно в период субкомпенсации происходит наиболее интенсивное накопление продуктов метаболического распада и раздражение костномозгового ростка [11, 15].

Выявленное нами увеличение индекса Кребса (соотношения нейтрофилов и лимфоцитов) коррелирует с данными медицины человека, где этот показатель рассматривается как маркер неблагоприятного прогноза при сердечно-сосудистой патологии [10, 13], а также дополняет немногочисленные ветеринарные исследования, посвященные лейкоцитарным индексам [12]. Одновременное снижение лимфоцитарных индексов (ЛИ и ИЛГ) на фоне нейтрофильного сдвига свидетельствует о развитии относительной лимфопении, которая в гуманной медицине признана фактором, определяющим тяжесть системного воспаления и объектом для терапевтической коррекции [15]. При прогрессировании эндокардиоза у собак происходит истощение адаптивного звена иммунитета вследствие хронической антигенной стимуляции и тканевой гипоксии.

Наиболее стабильным и прогностически значимым маркером показал себя индекс соотношения лейкоцитов и СОЭ (ИЛСОЭ), который неуклонно нарастал от I к IV функциональному классу, достигнув максимума у животных с терминальной стадией недостаточности и продемонстрировав наиболее сильную корреляцию с тяжестью патологии. Интегративная природа этого показателя, учитывающего как клеточный, так и гуморальный компоненты воспаления, позволяет рассматривать его в качестве надежного критерия активности воспалительного процесса при синдроме сердечной недостаточности. Снижение ЛИИ и ИСЛК при переходе к IV функциональному классу, вероятно, отражает не улучшение состояния, а развитие синдрома истощения костномозгового ростка на терминальной стадии болезни, когда

организм утрачивает способность к адекватному иммунному ответу, что согласуется с наблюдениями о парадоксальном снижении индексов при крайне тяжелых состояниях [14]. Отсутствие информативности индексов ИСЛМ и ИСНМ, по-видимому, связано с второстепенной ролью моноцитарного звена в формировании интоксикационного синдрома при данной патологии по сравнению с нейтрофильным.

Таким образом, проведенные исследования впервые на репрезентативном материале доказывают наличие системного воспалительного ответа при эндокардиозе у собак с помощью доступных расчетных гематологических методов. Динамика изученных индексов, в особенности ЯИ, ИК и ИЛСОЭ, отражает стадийность патологического процесса и может быть рекомендована в качестве дополнительного критерия для оценки тяжести состояния и мониторинга течения заболевания.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует наличие характерных и статистически значимых изменений комплекса гематологических индексов у собак с эндокардиозом митрального клапана, ассоциированных с развитием и прогрессированием хронической сердечной недостаточности. У собак с эндокардиозом развивается синдром эндогенной интоксикации и системного воспаления, что подтверждается комплексом взаимосвязанных изменений гематологических индексов. На это указывает достоверное повышение индексов, отражающих интоксикацию и воспалительный ответ (Ядерный индекс (ЯИ) Г.Д. Даштаянца, индекс Кребса (ИК), Лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ) по Островскому, индекс сдвига лейкоцитов (ИСЛК), на фоне снижения показателей, характеризующих иммунный статус, в частности Лимфоцитарный индекс (ЛИ), индекс лимфоцитов/гранулоцитов (ИЛГ). Выявленные нарушения имеют четкую зависимость от тяжести сердечной недостаточности. Наиболее выраженные отклонения от нормы, вплоть до пиковых значений, наблюдаются у животных со II и III функциональными классами сердечной недостаточности. Это позволяет рассматривать данные гематологические индексы не только как диагностические, но и как потенциальные прогностические маркеры, отражающие степень декомпенсации патологического процесса. Наиболее чувствительным и клинически значимым показателем является индекс соотношения лейкоцитов и СОЭ (ИЛСОЭ). Он продемонстрировал наиболее сильную положительную корреляцию ($r=0,36$) с функциональным классом сердечной недостаточности и прогрессивно нарастал по мере усугубления сердечной недостаточности, достигая максимума при IV функциональном классе. Это делает ИЛСОЭ ценным инструментом для мониторинга динамики воспалительного процесса у данной категории пациентов. Индексы ИСЛМ и ИСНМ не показали статистически значимой динамики и не являются информативными для

оценки тяжести эндокардиоза и сопутствующей ему хронической сердечной недостаточности.

Литература

1. Рыбдылов Д. Д. Лейкоцитарный индекс воспаления // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2010. № 2(72). С. 84-85.
2. Фенотип лимфоцитов у больных раком желудка и прямой кишки после иммунотерапии активированными лимфоцитами / Е. В. Абакушина, Ю. В. Маризина, Г. С. Неприна и др. // Медицинская иммунология. 2014. Т. 16. № 5. С. 449-456.
3. Руденко А. А. Концентрация сывороточных противомыокардиальных и противоклапанных аутоантител у собак при эндокардиозе митрального клапана // Российский ветеринарный журнал. 2017. № 8. С. 10-13.
4. Причины и диагностическая значимость кашля у собак, больных эндокардиозом / С. Н. Карташов, М. А. Петрова, А. И. Бутенков и др. // Ветеринарная патология. 2024. Т. 23. № 3. С. 25-34. doi: 10.23947/2949-4826-2024-23-3-25-34
5. Клинико-терапевтическое значение микробиоты при гнойно-воспалительных процессах у животных / Ю. А. Ватников, П. А. Руденко, А. А. Руденко и др. // Международный вестник ветеринарии. 2021. № 1. С. 286-291. doi:10.17238/issn2072-2419.2021.1.286
6. Оценка линейных эхокардиографических показателей у собак при эндокардиозе атриовентрикулярных клапанов сердца / А. А. Руденко, Ю. А. Ватников, Е. Д. Сотникова и др. // Ветеринария. 2021. № 1. С. 53-59. doi: 10.30896/0042-4846.2021.24.1.53-59
7. Коллапс трахеи и хронический бронхит как причина кашля у собак с эндокардиозом / С. Н. Карташов, М. А. Петрова, А. И. Бутенков и др. // Ветеринарная патология. 2024. Т. 23. № 4. С. 22-30. doi: 10.23947/2949-4826-2024-23-4-22-30
8. Никулина Н. Б., Здравосмыслова А. А. Диагностика эндокардиоза митрального клапана у мелких пород собак // Зоотехнический вестник Пермского института ФСИН России. 2025. № 3(8). С. 43-47.
9. Распространенность и эффективность лечения эндокардиоза митрального клапана у собак / Е. М. Марьин, В. А. Ермолаев, О. Н. Марьина и др. // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: Материалы Национальной научно-практической конференции, Димитровград, 15–16 мая 2018 года. Том I. Димитровград: Технологический институт - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина". 2018. С. 142-150.
10. Шишкина Е. А., Хлынова О. В., Туев А. В. Прогностическая значимость нейтрофильно-лимфоцитарного индекса у больных инфарктом миокарда // Уральский медицинский журнал. 2020. № 7(190). С. 26-31. doi: 10.25694/URMJ.2020.07.07
11. Сардаров Д. Д., Епифанова М. Н., Казаченко А. А. Нейтрофильно-лимфоцитарный индекс у пациентов с острым коронарным синдромом без подъема сегмента ST // Материалы итоговой конференции Военно-научного общества курсантов, студентов и слушателей Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 17 апреля 2024 года. Санкт-Петербург: Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова. 2024. С. 624-628.
12. Карпенко Л. Ю., Козицына А. И., Бахта А. А. Лейкоцитарные индексы клинически здоровых кошек // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2023. № 2. С. 153-156. doi: 10.52419/issn2782-6252.2023.2.153
13. Значение индекса Кребса для дифференциального диагноза у больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения / В. А. Малахов, Д. А. Красюк, А. В. Гетманенко и др. // Новости медицины и фармации. 2011. № 1(360). С. 24.
14. Интегральные гематологические индексы, как способ оценки реактивных изменений крови на нагрузку антиоксидантами / В. В. Леонов, О. Н. Павлова, О. Н. Гуленко и др. // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2022. Т. 16. № 4. С. 133-140. doi: 10.24412/2075-4094-2022-4-3-7
15. Лимфопения как фактор, определяющий тяжесть сепсиса, как точный критерий диагностики и как объект терапии / Е. И. Стрельцова, И. В. Пешкова, И. Ю. Саматов и др. // Journal of Siberian Medical Sciences. 2020. № 3. С. 108-125. doi:10.31549/2542-1174-2020-3-108-125

References

1. Rybdylov D. D. Leukocyte inflammation index // Bulletin of the East Siberian Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences. 2010. No. 2 (72). P. 84-85.
2. Lymphocyte phenotype in patients with gastric and rectal cancer after immunotherapy with activated lymphocytes / E. V. Abakushina, Yu. V. Marizina, G. S. Neprina, et al. // Medical Immunology. 2014. Vol. 16. No. 5. P. 449-456.
3. Rudenko A. A. Concentration of serum anti-myocardial and anti-valvular autoantibodies in dogs with mitral valve endocardiosis // Russian Veterinary Journal. 2017. No. 8. P. 10-13.
4. Causes and diagnostic significance of cough in dogs with endocardiosis / S. N. Kartashov, M. A. Petrova, A. I. Butenkov, et al. // Veterinary pathology. 2024. Vol. 23. No. 3. P. 25-34. doi: 10.23947/2949-4826-2024-23-3-25-34
5. Clinical and therapeutic significance of microbiota in purulent-inflammatory processes in animals / Yu. A. Vatinikov, P. A. Rudenko, A. A. Rudenko, et al. // International Bulletin of Veterinary Medicine. 2021. No. 1. P. 286-291. doi:10.17238/issn2072-2419.2021.1.286
6. Evaluation of linear echocardiographic parameters in dogs with endocardiosis of the atrioventricular heart valves / A. A. Rudenko, Yu. A. Vatinikov, E. D.

Sotnikova, et al. // Veterinary Science. 2021. No. 1. P. 53-59. doi: 10.30896/0042-4846.2021.24.1.53-59

7. Tracheal collapse and chronic bronchitis as a cause of cough in dogs with endocardiosis / S. N. Kartashov, M. A. Petrova, A. I. Butenkov, et al. // Veterinary pathology. 2024. Vol. 23. No. 4. P. 22-30. doi: 10.23947/2949-4826-2024-23-4-22-30

8. Nikulina N. B., Zdravosmyslova A. A. Diagnosis of mitral valve endocardiosis in small breed dogs // Zootechnical Bulletin of the Perm Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. 2025. No. 3(8). P. 43-47.

9. Prevalence and effectiveness of treatment of mitral valve endocardiosis in dogs / E. M. Maryin, V. A. Ermolaev, O. N. Maryina et al. // Science in modern conditions: from idea to implementation: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Dimitrovgrad, May 15-16, 2018. Volume I. Dimitrovgrad: Technological Institute - Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin". 2018. P. 142-150.

10. Shishkina E. A., Khlynova O. V., Tuev A. V. Prognostic significance of the neutrophil-lymphocyte index in patients with myocardial infarction // Ural Medical Journal. 2020. No. 7 (190). P. 26-31. doi: 10.25694/URMJ.2020.07.07

11. Sardarov D. D., Epifanova M. N., Kazachenko A. A. Neutrophil-lymphocyte index in patients with acute

coronary syndrome without ST-segment elevation // Proceedings of the final conference of the Military Scientific Society of cadets, students and listeners of the S. M. Kirov Military Medical Academy: Conference materials, St. Petersburg, April 17, 2024. St. Petersburg: S. M. Kirov Military Medical Academy. 2024. P. 624-628.

12. Karpenko L. Yu., Kozitsyna A. I., Bakhta A. A. Leukocyte indices of clinically healthy cats // Normative and legal regulation in veterinary medicine. 2023. No. 2. P. 153-156. doi: 10.52419/issn2782-6252.2023.2.153

13. The Value of the Krebs Index for Differential Diagnosis in Patients with Acute Cerebrovascular Accidents / V. A. Malakhov, D. A. Krasnyuk, A. V. Getmanenko, et al. // News of Medicine and Pharmaceuticals. 2011. No. 1(360). P. 24.

14. Integral Hematological Indices as a Method for Assessing Reactive Changes in Blood to Antioxidant Load / V. V. Leonov, O. N. Pavlova, O. N. Gulenko, et al. // Bulletin of New Medical Technologies. Electronic publication. 2022. Vol. 16. No. 4. P. 133-140. doi: 10.24412/2075-4094-2022-4-3-7

15. Lymphopenia as a factor determining the severity of sepsis, as an accurate diagnostic criterion, and as an object of therapy / E. I. Streltsova, I. V. Peshkova, I. Yu. Samatov, et al. // Journal of Siberian Medical Sciences. 2020. No. 3. P. 108-125. doi: 10.31549/2542-1174-2020-3-108-125

4.2.3. Инфекционные болезни и иммунология животных (ветеринарные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-91-98

УДК 616.9-036.22:528.91

Правила нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при вспышках болезней животных**К. В. Племяшов¹**, доктор ветеринарных наук, профессор, член-корр. РАН, ректор**В. А. Кузьмин^{1✉}**, доктор ветеринарных наук, профессор кафедры «Эпизоотология им. Урбана В.П.»**Д. А. Орехов¹**, кандидат ветеринарных наук, доцент, заведующий кафедрой «Организация, экономика и управление ветеринарным делом»**П. П. Щербаков²**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные системы в искусстве и гуманитарных науках»¹ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины

196084, Санкт-Петербург, ул. Черниговская, д. 5

²Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

✉kuzmin@epizoo.ru

Резюме. В ветеринарии электронные карты используются для отображения, анализа и моделирования эпизоотической ситуации, а также решения информационных и расчётных задач, связанных с распространением инфекционных болезней животных. В настоящее время отсутствуют национальные стандарты Российской Федерации (ГОСТы), в том числе предварительные национальные стандарты (ПНСТы), содержащие сведения из области эпизоотологического картографирования, с учётом современных цифровых технологий, что не позволяет унифицировать нормы, правила, требования, обозначения при проведении таких работ. Цель исследований заключалась в разработке структуры и состава проекта предварительного национального стандарта «Правила нанесения на эпизоотические карты ветеринарно значимых объектов» (ПНСТ), содержащего унифицированные требования нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при вспышках заразных/особо опасных болезней животных и определении структуры условных обозначений эпизоотологически значимых объектов, используемых в ПНСТ. В результате работы предложена структура и состав ПНСТ «Правила нанесения на эпизоотические карты ветеринарно значимых объектов», структура условных обозначений эпизоотологически значимых объектов для электронных карт. Предварительный национальный стандарт «Правила нанесения на эпизоотические карты ветеринарно значимых объектов» позволит систематизировать и актуализировать требования к работе с современными ветеринарно-географическими картами, показывающими географическое распространение отдельных болезней животных, эпизоотическое состояние различных территорий, размещение ветеринарно значимых объектов и другие стороны ветеринарной деятельности с использованием автоматизированных систем (АС) и программно-аппаратных комплексов (ПАК).

Ключевые слова: предварительный национальный стандарт, ветеринария, эпизоотические карты, ветеринарно значимые объекты.

Для цитирования: Правила нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при вспышках болезней животных / К. В. Племяшов, В. А. Кузьмин, Д. А. Орехов, П. П. Щербаков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 91-98 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-91-98

Rules for mapping the predicted and current situation in case of outbreaks of animal diseases**K.V. Plemyashov¹, V.A. Kuzmin^{1✉}, D. A. Orekhov¹, P.P. Shcherbakov²**¹FSBEI of HE "Saint-Petersburg State University of Veterinary Medicine",

196084, St. Petersburg, Chernigovskaya Street, 5

✉kuzmin@epizoo.ru

²Saint Petersburg State University

199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7-9

Abstract. In veterinary medicine, electronic maps are used to display, analyze, and model epizootic situations, as well as to solve information and computational problems related to the spread of infectious animal diseases. Currently, there are no national standards of the Russian Federation (GOSTs), including preliminary national standards (PNSTs), containing information on epizootic mapping that takes into account modern digital technologies. This precludes the unification of norms, rules, requirements, and designations for such work. The objective of this research was to develop the structure and content of the draft preliminary national standard "Rules for the inclusion of veterinary-significant objects on epizootic maps" (PNST), which contains unified requirements for the inclusion of predicted and current situations during outbreaks of

infectious/especially dangerous animal diseases on maps and to define the structure of symbols for epizootic-significant objects used in PNSTs. The work resulted in the proposed structure and composition of the preliminary national standard "Rules for marking veterinary-significant objects on epizootic maps" and a structure for the symbols for epizootic-significant objects on electronic maps. The preliminary national standard "Rules for marking veterinary-significant objects on epizootic maps" will systematize and update the requirements for working with modern veterinary-geographic maps showing the geographic distribution of individual animal diseases, the epizootic status of various territories, the location of veterinary-significant objects, and other aspects of veterinary activity using automated systems (AS) and hardware and software systems (HSS).

Keywords: Preliminary national standard, veterinary medicine, epizootic charts, veterinary facilities

For citation: Plemyashov K.V., Kuzmin V.A., Orekhov D.A., Shcherbakov P.P. Rules for mapping the predicted and current situation in case of outbreaks of animal diseases // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 91-98 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-91-98

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (рег. № НИОКТР 1025072800008-7)

Введение

Национальные стандарты в области ветеринарии являются важнейшим компонентом методического и нормативно-правового регулирования механизма обеспечения эпизоотического благополучия России, в связи с чем требуется их постоянная актуализация, также необходимо повышение эффективности применения действующего фонда нормативных и нормативно-технических документов в области ветеринарии в части обеспечения эпизоотического благополучия.

Важным аспектом является начатая ещё в 2024 г. разработка стандартизированной системы условных обозначений ветеринарно значимых объектов для использования их в современных автоматизированных системах и программно-аппаратных комплексах при эпизоотологическом картографировании, позволяющая унифицировать эти виды работ [1].

На наш взгляд, целесообразным решением поставленной задачи будет подготовка и регистрация предварительного национального стандарта (ПНСТ). Особенностью ПНСТов является их временный характер, отличием также будет являться индекс, присваиваемый таким документам - «ПНСТ», также при регистрации присваивается регистрационный номер и отделённый от него тире год утверждения.

По общему правилу применение основополагающих и предварительных национальных стандартов носит добровольный характер (исключение: см. ст. 26 ФЗ от 20.06.2015 г. №162-ФЗ) [2].

Сейчас можно выделить несколько нормативных и нормативно-технических документов в области ветеринарии, которые использовались при составлении карт эпизоотического состояния, в части обеспечения эпизоотического благополучия.

Прежде всего это Методика составления карты эпизоотического состояния района, утверждённая 21 октября 1967 года Начальником Главного управления ветеринарии МСХ СССР А. Третьяковым. Позже, в 2011 г. были разработаны методические рекомендации «Применение географической информационной системы ArcGIS в картографировании эпидемически значимых объектов, субъектов РФ» авторов: А.В. Бельчихина, М.В. Дудорова, А.К. Караулов и др. [3].

Сейчас на территории РФ действуют несколько ГОСТов, разработанных Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» и рабочей группой специалистов Технического комитета по стандартизации ТК 71 «Гражданская оборона, предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций», регламентирующих нанесение на карты обстановки при чрезвычайных ситуациях: ГОСТ Р 42.0.03-2016 «Национальный стандарт Российской Федерации. Гражданская оборона. Правила нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при ведении военных конфликтов и чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Условные обозначения» и ГОСТ 22.0.04-97/ГОСТ Р 22.0.04-95. «Межгосударственный стандарт. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации. Термины и определения» [4, 5].

В современном мире в связи с глобальной цифровизацией всё чаще используются цифровые и электронные карты, геоинформационное картографирование и пространственные данные [6, 7, 8].

При этом в настоящее время отсутствуют ГОСТы или ПНСТы, содержащие сведения из области эпизоотологического картографирования с учётом современных цифровых технологий. Электронные карты используются для отображения, анализа и моделирования, а также решения информационных и расчётных задач, связанных с распространением инфекционных болезней животных [9, 10, 11, 12].

Цель исследований – разработать структуру и состав проекта предварительного национального стандарта, содержащего унифицированные требования нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при вспышках заразных/особо опасных болезней животных и определить структуру условных обозначений эпизоотологически значимых объектов для электронных карт, используемых в ПНСТ.

Материалы и методы

Исследование проводили на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины». Основными

проводимыми в работе методами являлись: индукция, синтез, методы структурно-логического, системного, функционального анализа, метод компьютерных технологий, аналитический и графический методы. Материалами исследования являлись действующие и утратившие силу стандарты и рекомендации, содержащие информацию о ветеринарном картографировании.

Результаты

Проведя анализ действующих ГОСТов в области ветеринарной картографии, мы видим, что они не позволяют решать задачи на современном уровне, требуют доработки и актуализации по огромному перечню вопросов. Например, система условных знаков должна быть адаптирована для отображения на электронных картах, которые могут быть в векторном или растровом формате [13, 14].

Такая ситуация возникла в связи с утратой силы ряда документов и отсутствием современных стандартов. В качестве примера можно привести: отмену инструкции по ветеринарному учёту и ветеринарной отчётности, утверждённую Минсельхозом СССР 25 июня 1971 г., в которой приведено описание Журнала для записи эпизоотического состояния района/города (форма №3) и то, что одновременно с Журналом ведётся карта эпизоотического состояния района по методике, утверждённой Главным управлением ветеринарии Министерства сельского хозяйства СССР от 21 ноября 1967 г.. Также в 2024 году упразднён Перечень документов, подлежащих приему в государственные архивы СССР (утв. Главархивом СССР 21 декабря 1971 г.).

Л.Я. Юшкова сообщает, что в программе развития СФНЦА РАН 2021-2025 годы (по направлению №2 «Новые технологии в животноводстве») предусмотрены в ожидаемых результатах этой программы карты ветеринарного профиля, основная цель которых эффективный контроль эпизоотических процессов [15].

На сегодняшний день отсутствует стандарт, устанавливающий правила нанесения на карты ветеринарного профиля, в том числе электронные карты информации о территориях, зонах, объектах, средствах, затрагивающих вопросы организации, планирования мероприятий при вспышках заразных и особо опасных болезней животных, проведении противоэпизоотических мероприятий.

В данном стандарте заинтересованы прежде всего представители государственной ветеринарной службы РФ. Отметим, что до недавнего времени картографическая регистрация неблагополучных пунктов по 16 заразным болезням животных осуществлялась ветеринарными специалистами согласно методике составления карты эпизоотического состояния района 1967 г., полученный документ был постоянного хранения. Карта составлялась в два этапа (первый – составление географической основы, второй – нанесение показателей специального содержания). За основу брали карту административного деления

области. Методика содержала таблицу условных знаков для картографирования в ветеринарии, которая включала обозначения ветеринарных учреждений (лечебно-профилактического профиля, ветеринарные диагностические учреждения, учреждения по ветеринарно-санитарному контролю, учреждения зооветеринарного снабжения: всего 29 обозначений), условные знаки болезней животных (болезни общие по нескольким видам животных (14 обозначений), болезни лошадей (7 обозначений), болезни рогатого скота – 14 болезней; болезни свиней – 7 болезней; птиц – 7 болезней) и условные знаки видов животных – 10 обозначений [16].

При подготовке современного стандарта, содержащего правила нанесения на эпизоотические карты ветеринарно-значимых объектов, необходимо использовать нормативные ссылки на ряд уже действующих стандартов: ГОСТ 21667; ГОСТ Р 5160; ГОСТ Р 51608; ГОСТ Р 52293; ГОСТ Р 70318; ГОСТ Р 50828-95; ГОСТ 28441-99; ГОСТ Р 51353-99; ГОСТ Р 52155-2003; ГОСТ Р 52438-2005; ГОСТ Р 51606-2024.

Термины и определения следует использовать по: ГОСТ 28441, ГОСТ Р 52155, ГОСТ Р 52438, также следует ввести отсутствующие термины с соответствующими определениями (например: векторные данные, векторные форматы файлов, географические информационные системы, противоэпизоотические мероприятия, растровые (точечные) форматы графических файлов, эпизоотическая ситуация, QGIS и др.).

Раздел, включающий обозначения и сокращения, целесообразно наполнить такими обозначениями, как: автоматизированная информационная система (АИС); автоматизированное рабочее место (АРМ); база данных (БД); база картографических данных (БКД); база пространственных данных (БПД); геоинформационная система (ГИС) и др., следует дать им расшифровку.

В разделе общие требования к нанесению условных обозначений на карты следует отразить требования к ведению электронных карт при прогнозировании распространения заразной и/или особо опасной болезни животных. Отображение эпизоотической ситуации и нанесение условных обозначений должно быть чётким и ясным.

В тексте раздела необходимо отметить, что размеры зон и очагов определяются расчётно-графическим и расчётно-аналитическим методами с применением моделирования ситуации с учётом параметров распространения возбудителя болезни, их наносят с чётким выделением границ.

Правила и порядок нанесения информации на прогнозные электронные эпизоотические карты должны содержать: способ нанесения (автоматический, автоматизированный, ручной); деление условных обозначений (масштабные, внесматштабные); ссылку на ГОСТ 2.304; характеристику отображаемой информации (эпизоотические очаги и др.).

4.2.3. Инфекционные болезни и иммунология животных (ветеринарные науки)

Важно соблюдать требования оформления электронных карт (использовать установленные условные знаки, данные эпизоотической обстановки наносить тонкими линиями), что должно предотвратить затемнение топографической основы и надписей на ней.

К электронной эпизоотической карте должна быть предусмотрена возможность приложения пояснительной записки в виде текстового документа или отдельного слоя электронной карты.

Автоматизация процессов внесения картографической информации, её обработка и отображение должны обеспечиваться применением программно-

аналитических комплексов (ПАК) и автоматизированных систем (АС) [17, 18].

Структура и состав полей баз данных по ведению информации, а также функциональные возможности и назначение геоинформационных систем в автоматизированных системах и программно-аналитических комплексах должны обеспечивать создание, редактирование и хранение карт-подложек, карт-шаблонов; представление пространственных геоданных; результатов моделирования и прогнозирования.

Структура разработанных нами условных обозначений эпизоотологически значимых объектов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Структура условных обозначений эпизоотологически значимых объектов

Структура условных обозначений эпизоотологически значимых объектов	
1. Виды животных.	всего 15 обозначений;
2. Объекты, имеющие эпизоотологическое значение	а) организации и учреждения лечебно-профилактического назначения: станции по борьбе с болезнями животных (СББЖ), ветеринарные участки (ВУ), пункты (ВП), лечебницы (ВЛ), ветеринарные клиники и центры. Диагностическую функцию обеспечивают ветеринарные лаборатории (ВЛ) и лаборатории ветеринарно-санитарной экспертизы (ЛВСЭ); б) объекты обезвреживания и утилизации биологических отходов: инсинераторы (крематоры), ветеринарно-санитарные утилизационные заводы, специально выделенные площадки для сжигания трупов животных, а также биотермические ямы/ямы Беккари; в) объекты системы экстренного реагирования: мобильные противозооотические отряды, карантинные ветеринарно-полицейские посты; г) места долговременного риска: скотомогильники, в том числе сибиреязвенные; д) организации, обеспечивающие производство, хранение и розничную реализацию лекарственных средств для ветеринарного применения (включая биофабрики и ветеринарные аптеки);
3. Поднадзорные объекты аграрного и перерабатывающего профиля	а) производители продукции животноводства – хозяйства по содержанию крупного рогатого скота: животноводческие комплексы, личные подсобные хозяйства (ЛПХ), крестьянские фермерские хозяйства (КФХ); хозяйства по содержанию мелкого рогатого скота: животноводческие комплексы, личные подсобные хозяйства (ЛПХ), крестьянские фермерские хозяйства (КФХ); хозяйства по содержанию птицы: птицеводческие комплексы, личные подсобные хозяйства (ЛПХ), крестьянские фермерские хозяйства (КФХ); хозяйства по содержанию свиней: свиноводческие комплексы, личные подсобные хозяйства (ЛПХ), крестьянские фермерские хозяйства (КФХ); б) коневодческое хозяйство/конноспортивный клуб; места содержания и работы с собаками (приюты, кинологовические центры, площадки для дрессировки); звероводческие хозяйства/фермы; пчеловодческие хозяйства/пасеки; в) предприятия импортёры продукции животноводства/птицеводства/рыбоводства; г) молоко перерабатывающие предприятия (молокоперерабатывающий завод; сыродельный завод); д) места убой продуктивных животных и птицы (убойно-санитарный пункт (санбойня), убойная площадка); е) предприятия по производству, переработки, хранению мясного сырья – мясоперерабатывающий комбинат; хладокомбинат; мясоперерабатывающие предприятия по хранению и переработке кишечного сырья; предприятия по производству мясных полуфабрикатов; ё) предприятия по производству рыбных консервов; предприятия по производству мясных консервов; ж) предприятия по производству пищевой масложировой продукции; з) предприятия по производству и хранению рыбных продуктов и полуфабрикатов; и) кожевенные и кожсырьевые производства;
4. Ветеринарно значимые объекты общей инфраструктуры территорий (жилищно-коммунального хозяйства)	а) места временного накопления отходов производства и потребления (свалки); б) транспортные узлы (железнодорожные и автовокзалы/станции, морские и речные порты, аэропорты), а также автомобильные дороги как каналы перемещения людей, животных, кормов и грузов; в) научно-исследовательские институты и образовательные организации (высшего и профессионального образования) медицинского, биологического и ветеринарного профиля.
5. Специализированные площадки и учреждения, где сосредоточены биологические риски или высокая плотность контактов животных	а) виварии, зоопарки, дельфинарии, цирки, питомники, гостиницы для животных, специализированные выставки; б) сельскохозяйственные ярмарки и продуктовые рынки; в) станции племенной работы и искусственного разведения сельскохозяйственных животных; г) природные заказники, национальные парки, заповедники и охотничьи хозяйства; д) предприятия по производству кормов для животных;
6. Инфекционные болезни животных, человека и эпизоотические очаги	а) инфекционные болезни, общие для разных видов животных и человека – 21 возбудитель; б) инфекционные болезни крупного и мелкого рогатого скота и человека – 27 возбудителей; в) инфекционные болезни лошадей и человека – 10 возбудителей; г) инфекционные болезни свиней и человека – 11 возбудителей; д) инфекционные болезни птиц и человека – 15 возбудителей; е) инфекционные болезни пушных зверей, собак, кошек – 12 возбудителей;

	ё) инфекционные болезни рыб – 11 возбудителей; ж) инфекционные болезни моллюсков и ракообразных – 6 возбудителей; з) инфекционные болезни пчёл – 7 возбудителей;
7. Инвазионные болезни животных, человека и эпизоотические очаги	а) инвазионные болезни, общие для разных видов животных и человека – 18 возбудителей; б) инвазионные болезни крупного, мелкого рогатого скота и человека – 20 возбудителей; в) инвазионные болезни лошадей – 10 возбудителей; г) инвазионные болезни свиней и человека – 9 возбудителей; д) инвазионные болезни птиц – 14 возбудителей; е) инвазионные болезни пушных зверей – 3 возбудителя; ё) инвазионные болезни плотоядных – 9 возбудителей; ж) инвазионные болезни пчёл – 2 возбудителя.

Структура данных включает наименование заразной/особо опасной болезни животных (рус. / лат. / англ.); условные обозначения эпизоотических очагов в различных состояниях (свежий стационарный; затухающий в стадии ликвидации; ликвидированный); признак восприимчивости для различных видов животных и человека. Тип ЭВМ: IBM PC- совмест. ПК; ОС: Windows XP/7/10/11 [19, 20].

Условные обозначения и знаки для карт (электронных карт) используются при масштабах отображения до 1:100000, от 1:100000 до 1:200000, от 1:200000 до 1:500000, от 1:500000 до 1:1000000.

Обсуждение

Полученные результаты представляют значительный интерес для современной ветеринарной медицины в части профилактики и ликвидации заразных и особо опасных болезней животных, так как использование электронных карт, автоматизированных систем (АС) и программно-аппаратных комплексов (ПАК) в ветеринарном картографировании становится необходимым. В то же время многочисленные научные исследования в области ветеринарии, связанные с представленной темой, в полной мере не смогли систематизировать и унифицировать эти виды работ.

Актуальность нашего исследования прежде всего обусловлена острой необходимостью наличия документа, национального стандарта, предназначенного для формализации и установления требований в области ветеринарной картографии.

Ветеринарная картография – важнейший элемент, обеспечивающий эффективный контроль эпизоотических процессов. Актуализация и совершенствование методов ветеринарной картографии во многом будет способствовать обеспечению реализации задач государственной ветеринарной службы России в части обеспечения эпизоотического благополучия [21].

Проведённые исследования наглядно показывают необходимость и своевременность разработки предварительного национального стандарта «Правила нанесения на эпизоотические карты ветеринарно значимых объектов», а вопросы, поставленные целью настоящей работы, имеют огромное значение для сохранения эпизоотического благополучия страны.

Заключение

Выявлена проблема, связанная с отсутствием действующих национальных стандартов и предварительных национальных стандартов (ПНСТ),

содержащих унифицированные требования нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при вспышках заразных/особо опасных болезней животных.

С учётом анализа ранее действующих документов, регламентирующих работу в области ветеринарной картографии, предложена структура и состав предварительного национального стандарта (ПНСТ), который позволит систематизировать и актуализировать требования к работе с современными ветеринарно-географическими картами, показывающими географическое распространение отдельных болезней животных, эпизоотическое состояние различных территорий, размещение ветеринарно-значимых объектов и другие аспекты ветеринарной деятельности.

При разработке проекта ПНСТ, который целесообразно использовать при отображении эпизоотического состояния района, планировании мероприятий при ликвидации заразных/особо опасных болезней животных сделан акцент на использование электронных карт, программно-аппаратных комплексов и автоматизированных систем.

В работе представлена структура условных обозначений эпизоотологически значимых объектов для электронных карт, используемых в ПНСТ.

Литература

1. Борисов Н.В. Формирование требований к системе условных обозначений для эпизоотологического мониторинга на муниципальном уровне с использованием ГИС / Н.В. Борисов, П.П. Щербаков, В.В. Захаркина и др. // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 115. С. 129-135. doi: 10.21515/1999-1703-115-129-135. EDN JEUCMY.
2. Панова А.С. Роль национальной стандартизации в правовом обеспечении качества товаров // Предпринимательское право. 2017. № 1. С. 38 - 44.
3. Методические рекомендации применение географической информационной системы ArcGis в картографировании эпидемически значимых объектов субъектов РФ / А. В. Бельчихина, М. В. Дудорова, А.К. Караулов и др. Владимир: ФГУ «ВНИИЗЖ», 2011. 33 с.
4. ГОСТ Р 42.0.03-2016. «Национальный стандарт Российской Федерации. Гражданская оборона. Правила нанесения на карты прогнозируемой и сложившейся обстановки при ведении военных конфликтов и чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Условные обозначения» (утв. и

введен в действие Приказом Росстандарта от 29.06.2016 № 728-ст).

5. ГОСТ 22.0.04-97/ГОСТ Р 22.0.04-95. «Межгосударственный стандарт. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации. Термины и определения» (принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 25.01.1995 № 16).

6. Географические информационные системы (ГИС) в эпизоотологическом мониторинге лейшманиоза собак в хозяйствах Армении / Р.В. Слободяник, В.А. Кузьмин, П.П. Щербаков и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2024. № 4. С. 51-54. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.4.51. EDN DTILGM.

7. Географические информационные системы в эпизоотологическом мониторинге дирофиляриоза собак в хозяйствах Армении / Р.В. Слободяник, В.А. Кузьмин, П.П. Щербаков и др. // Современные проблемы общей и частной паразитологии: материалы V международного паразитологического симпозиума, посвященные 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 155-летию со дня рождения В.Л. Якимова, Санкт-Петербург, 03–05 декабря 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, 2025. С. 291-294. EDN MYNPKO.

8. Оптимальный способ применения геоинформационных систем с графическими элементами условных обозначений ветеринарных объектов в векторном формате / Н. В. Борисов, П. П. Щербаков, В. В. Захаркина и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2024. № 3. С. 34-39. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.3.34. EDN KNDMGG.

9. Принципы математического моделирования инфекционных болезней в зоне взаимодействия дикой природы и животноводства / В. А. Кузьмин, Д. А. Орехов, А. Б. Айдиев и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2025. № 3. С. 42-47. doi: 10.52419/issn2782-6252.2025.3.42. EDN PREJAC.

10. Гулюкин А. М. Принципы построения информационно-аналитической системы прогнозирования и моделирования эпизоотологических рисков // Ветеринария. 2024. № 9. С. 3-8. doi: 10.30896/0042-4846.2024.27.9.03-08. EDN FMTNUS.

11. Лобанова В. А. Математические подходы к профилактике бешенства // Международный вестник ветеринарии. 2021. № 1. С. 30-41. EDN PDOEXM.

12. Эпизоотологический риск заразной патологии животных в АПК северо-западного региона России / В. А. Березкин, О. В. Козыренко, Н. В. Морозов и др. // Ветеринарная патология. 2023. № 1(83). С. 31-37. doi: 0.23947/1682-5616-2023-22-31-37. EDN ADCNHL.

13. Применение геоинформационных технологий при планировании противоэпизоотических мероприятий при бешенстве / А. А. Шабейкин, А. М. Гулюкин, В. В. Патрикеев и др. // Ветеринария и

кормление. 2023. № 6. С. 79-84. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2023-6-18. EDN DNOLAA.

14. Оптимальный способ применения геоинформационных систем с графическими элементами условных обозначений ветеринарных объектов в векторном формате / Н. В. Борисов, П. П. Щербаков, В. В. Захаркина и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2024. № 3. С. 34-39. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.3.34. EDN KNDMGG.

15. Юшкова Л.Я. ветеринарная картография, как метод планирования противоэпизоотических мероприятий // Актуальные проблемы лечения и профилактики болезней молодняка: Материалы Международной научно-практической конференции, Витебск, 03–05 ноября 2021 года / Редколлегия: Н.И. Гавриченко (гл. ред.) и др. Витебск: Учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины», 2021. –С. 171-175. EDN OGPКСВ.

16. «Инструкция по ветеринарному учету и ветеринарной отчетности» (утв. Минсельхозом СССР 25.06.1971).

17. Гулюкин А. М., Шабейкин А. А., Белименко В. В. Эпизоотологические геоинформационные системы. Возможности и перспективы // Ветеринария. 2016. № 7. С. 21-24.

18. Моделирование пространственно-временных данных об окружающей среде в ГИС / В. А. Кузьмин, С. И. Шаныгин, С. А. Чунин и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2022. № 3. С. 43-50. doi: 10.52419/issn2782-6252.2022.3.43. EDN FVSFFS.

19. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621105 Российская Федерация. База данных условных обозначений эпизоотологически значимых объектов для использования в ГИС: заявл. 28.12.2024; опубл. 13.03.2025 / К. В. Племяшов, В. А. Кузьмин, Д. А. Орехов и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины». EDN RABENW.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025666224 Российская Федерация. Программное средство для моделирования развития и мониторинга эпизоотической ситуации: заявл. 19.05.2025; опубл. 24.06.2025 / К. В. Племяшов, В. А. Кузьмин, Д. А. Орехов и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины». EDN HFWXHE.

21. Различные подходы к синтетическому моделированию эпизоотического процесса инфекционных болезней животных для эффективного принятия управленческих решений / К. В. Племяшов, В. А. Кузьмин, Д. А. Орехов и др. // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2025. № 4. С. 59-65. doi: 10.52419/issn2782-6252.2025.4.59. EDN OMGHWR.

References

1. Borisov N.V. Formation of requirements for the system of symbols for epizootological monitoring at the municipal level using GIS / N.V. Borisov, P.P. Shcherbakov, V.V. Zakharkina, et al. // *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024. No. 115. P. 129-135. doi: 10.21515/1999-1703-115-129-135. EDN JEUCMY.
2. Panova A.S. The role of national standardization in legal support of the quality of goods // *Entrepreneurial law*. 2017. No. 1. P. 38-44.
3. Methodological recommendations for the use of the ArcGis geographic information system in mapping epidemiologically significant objects in the constituent entities of the Russian Federation / A. V. Belchikhina, M. V. Dudorova, A. K. Karaulov, et al. Vladimir: FGU "VNIIZH", 2011. 33 p.
4. GOST R 42.0.03-2016. "National standard of the Russian Federation. Civil defense. Rules for applying to maps the forecasted and current situation during military conflicts and natural and man-made emergencies. Symbols" (approved and put into effect by Order of Rosstandart dated June 29/ 2016. No. 728-st).
5. GOST 22.0.04-97/GOST R 22.0.04-95. "Interstate Standard. Safety in Emergencies. Biological and Social Emergencies. Terms and Definitions" (adopted and put into effect by the Resolution of the State Standard of Russia dated January 25. 1995. No. 16).
6. Geographic Information Systems (GIS) in Epizootological Monitoring of Canine Leishmaniasis in Farms in Armenia / R.V. Slobodjanik, V.A. Kuzmin, P.P. Shcherbakov, et al. // *Normative-legal regulation in veterinary medicine*. 2024. No. 4. P. 51-54. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.4.51. EDN DTILGM.
7. Geographic Information Systems in Epizootological Monitoring of Canine Dirofilariosis in Farms in Armenia / R.V. Slobodjanik, V.A. Kuzmin, P.P. Shcherbakov, et al. // *Modern problems of general and specific parasitology: Proceedings of the V International Parasitological Symposium dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War and the 155th anniversary of the birth of V.L. Yakimov*, St. Petersburg, December 3–5, 2025. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Veterinary Medicine, 2025. P. 291–294. EDN MYNPKO.
8. Optimal method for using geographic information systems with graphic elements of symbols for veterinary objects in vector format / N. V. Borisov, P. P. Shcherbakov, V. V. Zakharkina, et al. // *Normative-legal regulation in veterinary medicine*. 2024. No. 3. P. 34–39. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.3.34. EDN KHDMMG.
9. Principles of mathematical modeling of infectious diseases in the zone of interaction of wildlife and livestock / V. A. Kuzmin, D. A. Orekhov, A. B. Aidiev, et al. // *Normative and legal regulation in veterinary medicine*. 2025. No. 3. P. 42-47. doi: 10.52419/issn2782-6252.2025.3.42. EDN PREJAC.
10. Gulyukin A. M. Principles of constructing an information and analytical system for forecasting and modeling epizootological risks // *Veterinary science*. 2024. No. 9. P. 3-8. doi: 10.30896/0042-4846.2024.27.9.03-08. EDN FMTNUS.
11. Lobanova V. A. Mathematical approaches to rabies prevention // *International Veterinary Bulletin*. 2021. No. 1. P. 30-41. EDN PDOEXM.
12. Epizootological risk of contagious animal pathology in the agro-industrial complex of the northwestern region of Russia / V. A. Berezkin, O. V. Kozyrenko, N. V. Morozov, et al. // *Veterinary pathology*. 2023. No. 1 (83). P. 31-37. doi: 0.23947/1682-5616-2023-22-31-37. EDN ADCNHL.
13. Application of geoinformation technologies in planning anti-epidemic measures for rabies / A. A. Shabeikin, A. M. Gulyukin, V. V. Patrikeev, et al. // *Veterinary science and feeding*. 2023. No. 6. P. 79-84. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2023-6-18. EDN DNOLAA.
14. Optimal method of using geoinformation systems with graphic elements of symbols for veterinary objects in vector format / N. V. Borisov, P. P. Shcherbakov, V. V. Zakharkina, et al. // *Normative-legal regulation in veterinary medicine*. 2024. No. 3. P. 34-39. doi: 10.52419/issn2782-6252.2024.3.34. EDN KHDMMG.
15. Yushkova L. Ya. Veterinary cartography as a method for planning anti-epidemic measures // *Actual problems of treatment and prevention of diseases of young animals: Proceedings of the International scientific and practical conference, Vitebsk, November 3–5, 2021* / Editorial board: N. I. Gavrichenko (editor-in-chief) et al. Vitebsk: Educational institution "Vitebsk Order of the Badge of Honor State Academy of Veterinary Medicine", 2021. –P. 171–175. EDN OGPKCB.
16. "Instructions for veterinary registration and veterinary reporting" (approved by the USSR Ministry of Agriculture on June 25, 1971).
17. Gulyukin A. M., Shabeikin A. A., Belimenko V. V. Epizootological geoinformation systems. Possibilities and prospects // *Veterinary science*. 2016. No. 7. P. 21-24.
18. Modeling spatiotemporal environmental data in GIS / V. A. Kuzmin, S. I. Shanygin, S. A. Chunin, et al. // *Normative and legal regulation in veterinary medicine*. 2022. No. 3. P. 43-50. doi: 10.52419/issn2782-6252.2022.3.43. EDN FVSFFS.
19. Certificate of state registration of database No. 2025621105 Russian Federation. Database of symbols of epizootologically significant objects for use in GIS: declared 28.12.2024: published 13.03.2025 / K. V. Plemyashov, V. A. Kuzmin, D. A. Orekhov et al.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine". EDN RABENW.
20. Certificate of state registration of computer program No. 2025666224 Russian Federation. Software for modeling the development and monitoring of an epizootic situation: declared 19.05.2025: published 24.06.2025 / K. V. Plemyashov, V. A. Kuzmin, D. A. Orekhov, et al.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine". EDN HFWXHE.

21. Various approaches to synthetic modeling of the epizootic process of infectious animal diseases for effective management decision-making / K. V. Plemyashov, V.

A. Kuzmin, D. A. Orekhov, et al. // Normative-legal regulation in veterinary medicine. 2025. No. 4. P. 59-65. doi: 10.52419/issn2782-6252.2025.4.59. EDN OMGHWR.

4.2.3. Инфекционные болезни и иммунология животных (биологические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-99-105

УДК 639.3.09

ВОХ-ПЦР как инструмент для отслеживания патогенных клонов бактерий рода *Aeromonas* в водных экосистемах

С. С. Картакаева✉, соискатель кафедры «Микробиология, вирусология, эпизоотология и ветеринарно-санитарная экспертиза»

А. А. Ломакин, кандидат биологических наук, ассистент кафедры «Микробиология, вирусология, эпизоотология и ветеринарно-санитарная экспертиза»

Н. А. Феоктистова, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Микробиология, вирусология, эпизоотология и ветеринарно-санитарная экспертиза»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, здание 1

✉seravka@mail.ru

Резюме. Работа посвящена молекулярно-генетическому анализу штаммов бактерий рода *Aeromonas* – значимых патогенов аквакультуры и условно-патогенных микроорганизмов водной среды. Цель исследований – оценка генетического разнообразия и филогенетической структуры изолятов *Aeromonas* с использованием метода ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга. В исследовании были задействованы как референс-штаммы (*A. hydrophila* ATCC 49140, *A. veronii* ATCC 9071, *A. caviae* ATCC 15468, *A. salmonicida* ATCC 33658), так и полевые изоляты, выделенные из рыб и объектов ветеринарно-санитарного надзора. Метод ВОХ-ПЦР позволил выявить два противоположных типа генетической организации внутри рода. Психрофильные штаммы *A. salmonicida* продемонстрировали высокую генетическую консервативность, формируя единый мономорфный кластер с нулевыми генетическими дистанциями, что характерно для клональных, узкоспециализированных патогенов. Напротив, мезофильные виды (*A. hydrophila*, *A. veronii*, *A. caviae*) показали выраженную филогенетическую дивергенцию, распределяясь по нескольким генетическим линиям, что свидетельствует об их значительной эволюционной изменчивости и внутривидовом полиморфизме. Особое положение в филогенетическом древе заняли нетипированные изоляты *Aeromonas* sp., что указывает на возможное наличие неидентифицированных генетических вариантов в природных популяциях. Полученные результаты подтверждают эффективность ВОХ-ПЦР как инструмента для дифференциации видов *Aeromonas*, оценки генетической стабильности популяций и выявления эпизоотологически значимых клонов. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции данного метода в систему молекулярно-эпидемиологического мониторинга для своевременного выявления, идентификации и отслеживания распространения патогенных штаммов в аквакультурных хозяйствах и естественных водоёмах, что может способствовать совершенствованию мер биобезопасности и контроля инфекционных заболеваний рыб.

Ключевые слова: *Aeromonas*, ВОХ-ПЦР, генетическое разнообразие, филогенетическая структура, молекулярное типирование.

Для цитирования: Картакаева С. С., Ломакин А. А., Феоктистова Н. А. ВОХ-ПЦР как инструмент для отслеживания патогенных клонов бактерий рода *Aeromonas* в водных экосистемах // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 99-105. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-99-105

BOX-PCR as a tool for tracking pathogenic clones of *Aeromonas* bacteria in aquatic ecosystems

S. S. Kartakaeva✉, **A. A. Lomakin**, **N. A. Feoktistova**

Ulyanovsk State Agrarian University

432000, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, Building 1

✉seravka@mail.ru

Abstract. This study examines the molecular genetic analysis of *Aeromonas* bacterial strains – significant aquaculture pathogens and opportunistic aquatic pathogens. The objective of the study was to assess the genetic diversity and phylogenetic structure of *Aeromonas* isolates using the Box-PCR fingerprinting method. The study involved both reference strains (*A. hydrophila* ATCC 49140, *A. veronii* ATCC 9071, *A. caviae* ATCC 15468, *A. salmonicida* ATCC 33658) and field isolates from fish and veterinary and sanitary surveillance sites. The BOX-PCR method revealed two opposing types of genetic organization within the genus. Psychrophilic strains of *A. salmonicida* demonstrated high genetic conservation, forming a single monomorphic cluster with zero genetic distances, which is characteristic of clonal, highly specialized pathogens. In contrast, mesophilic species (*A. hydrophila*, *A. veronii*, *A. caviae*) showed pronounced phylogenetic divergence, distributed across several genetic lineages, indicating their significant evolutionary variability and intraspecific polymorphism. Untyped *Aeromonas* sp. isolates occupied a special position in the phylogenetic tree, indicating the possible presence of unidentified

genetic variants in natural populations. The results confirm the effectiveness of Box-PCR as a tool for differentiating *Aeromonas* species, assessing the genetic stability of populations, and identifying epizootologically significant clones. The practical significance of this study lies in the potential for integrating this method into a molecular epidemiological monitoring system for the timely detection, identification, and tracking of pathogenic strains in aquaculture farms and natural water bodies, which could contribute to improved biosecurity measures and the control of infectious fish diseases.

Keywords: *Aeromonas*, Box-PCR, genetic diversity, phylogenetic structure, molecular typing.

For citation: Kartakaeva S. S., Lomakin A. A., Feoktistova N. A. BOX-PCR as a tool for tracking pathogenic clones of *Aeromonas* bacteria in aquatic ecosystems // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 99-105 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-99-105

Введение

Развитие аквакультуры, ставшей одним из ключевых источников белковой продукции для удовлетворения потребностей растущего населения планеты, сопровождается рядом серьёзных вызовов. Одним из наиболее значимых является распространение инфекционных заболеваний, вызываемых водными патогенами, которые наносят существенный экономический ущерб и могут представлять риски для здоровья человека. Среди возбудителей, ограничивающих эффективность рыбоводства, особое место занимают бактерии рода *Aeromonas* – грамотрицательные, факультативно-анаэробные микроорганизмы, широко распространённые в пресных и морских водоёмах [1].

Представители рода *Aeromonas* характеризуются высокой адаптивной пластичностью и способны вызывать заболевания у широкого круга хозяев – от холодно-кровных гидробионтов до теплокровных животных и человека [2]. Для рыб аэромонады являются этиологическими агентами таких патологий, как фурункулёз, геморрагический септицемия, язвенная болезнь и другие системные инфекции, особенно в условиях стресса, высокой плотности посадки или нарушения зоогигиенических норм [3]. Для человека *Aeromonas* spp. представляют угрозу как оппортунистические патогены, способные вызывать гастроэнтериты, раневые инфекции, сепсис и поражения внутренних органов, особенно у лиц с иммунодефицитными состояниями [4].

Сложность контроля аэромонадных инфекций усугубляется значительным генетическим и фенотипическим разнообразием внутри рода, которое осложняет точную идентификацию, дифференциацию патогенных и непатогенных изолятов, а также отслеживание источников и путей распространения возбудителя [1, 5]. Традиционные методы типирования, основанные на биохимических и культуральных характеристиках, зачастую недостаточно чувствительны и специфичны для решения эпидемиологических задач. В этой связи возрастает роль молекулярно-генетических методов, позволяющих проводить высокоразрешающий анализ на уровне штаммов [6].

Одним из таких методов является ВОХ-ПЦР (BOX-PCR fingerprinting) – вариант ПЦР-фингерпринтинга, основанный на амплификации межмикросателлитных последовательностей (ВОХ-элементов), распределённых по бактериальному геному. Этот метод отличается высокой воспроизводимостью, быстротой исполнения и способностью выявлять внутривидовые генетические вариации, что делает его эффективным инструментом для изучения популяционной структуры, эпидемиологического

картирования и отслеживания клонального распространения микроорганизмов [7, 8].

В контексте рода *Aeromonas* применение ВОХ-ПЦР представляет особый интерес для сравнительного анализа генетической организации психрофильных (преимущественно *A. salmonicida*) и мезофильных видов (*A. hydrophila*, *A. veronii*, *A. caviae* и др.). Известно, что психрофильные штаммы, адаптированные к низким температурам и часто связанные со специфическими хозяевами, могут демонстрировать высокую генетическую стабильность и клональность [9, 10]. В то же время мезофильные виды, обитающие в более разнообразных экологических нишах, предположительно обладают большей эволюционной пластичностью и генетическим полиморфизмом [11, 12, 13]. Сравнительный анализ этих групп с использованием ВОХ-ПЦР может пролить свет на закономерности микроэволюции, пути адаптации к разным экологическим условиям и механизмы вирулентности внутри рода.

Цель исследований – комплексная оценка генетического разнообразия и филогенетической структуры штаммов *Aeromonas*, выделенных из объектов аквакультуры и природных водоёмов, с использованием метода ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга.

Материалы и методы

Объекты исследований: полевые изоляты, выделенные из объектов ветеринарно-санитарного надзора, включая прудовую и речную рыбу и идентифицированные как представители рода *Aeromonas*, идентифицированных на основе биологических и молекулярно – генетических свойств (детекция участков генов вирулентности и функциональных генов): *A. salmonicida* 2001, *A. salmonicida* 4914, *A. salmonicida* 61, *A. salmonicida* 43, *A. salmonicida* 54, *A. salmonicida* 65, *A. salmonicida* 76, *A. salmonicida* 87, *A. salmonicida* 88, *Aeromonas* sp. CM-1, *A. bestiarum* ПА, *Aeromonas* sp. БО, *Aeromonas* sp. АТ, *A. veronii* CM-2, *A. veronii* РВО, *A. veronii* ТУ, *Aeromonas* sp. П1, *Aeromonas* sp. ПТ, *Aeromonas* sp. АРТ-2 и *A. veronii* SD. Референс – штаммы: *A. salmonicida* ATCC 33658, *A. veronii* ATCC 9071, *A. hydrophila* ATCC 49140, *A. caviae* ATCC 15468, *A. bestiarum* ЧР.

Для культивирования бактериальных штаммов использовали LB-бульон от компании «Диаэм» (Россия). Мезофильные штаммы инкубировали при 30 ± 2 °C, а психрофильные штаммы *A. salmonicida* – при 20 ± 2 °C в течение 48 часов.

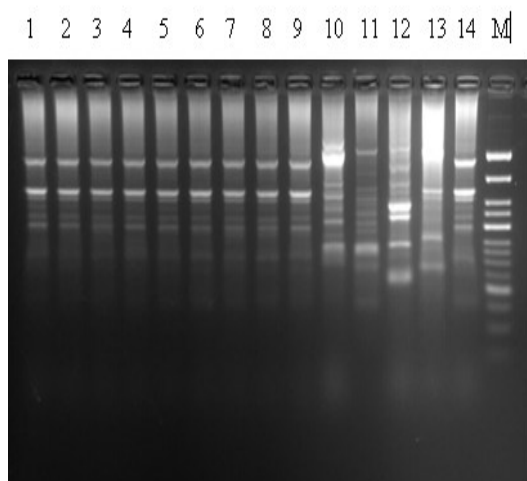
Для выделения ДНК бактериальных изолятов использовали набор «М-Сорб-ООМ» от «Синтол» (Россия). Количество ДНК измеряли спектрофотометром EPPENDORF BioSpectrometer kinetic (Германия).

Концентрацию доводили до 100 мкг/мл. Качество оценивали по чистоте (1,8–2,08).

Для постановки ПЦР использовали амплификатор DTprime (ДНК-технологии, Россия). Для амплификации применяли реакционную смесь БиоМастер HS-Taq ПЦР-Color (БиоЛабмикс) (Россия). Все изоляты *Aeromonas* прошли тестирование методом ВОХ-ПЦР для выявления их генотипов с использованием специфических праймеров (ВОХ A1R 5'-CTACGGCAAGGCGACGCTGACG-3') [7]. Реакции проводили в объеме 50 микролитров. Праймеры добавляли в количестве 20 пикомоль на каждую пробу. В каждую реакцию вносили 5 микролитров ДНК изучаемого штамма. Доведение до необходимого объема осуществляли с использованием воды для молекулярной биологии производства Neofroxx (Германия). Для предотвращения испарения в процессе амплификации в каждую лунку, содержащую реакционную смесь и ДНК, добавляли минеральное масло (CDH, Индия).

Протокол для постановки реакции: первичная денатурация при 95 °С в течении 5 минут (1 цикл), денатурация 95 °С – 1 минута, отжиг при 52 °С – 1 минута, элонгация при 72 °С – 5 минут (35 циклов), финальная элонгация в течении 10 минут при 72 °С.

Для визуализации результатов амплификации использовали гелевую систему Bio-print CX4 Edge (Vilber, Франция). Электрофорез проводили с помощью блока PowerPac (BioRad, США) и камеры SE-2 (Helicon, Россия). Ампликоны разделяли в 2%-ном агарозном геле с 20 мл 1 %-ного бромистого этидия (AppliChem, США) на 100 мл геля при напряжении 150 В в течение 30 минут.



А

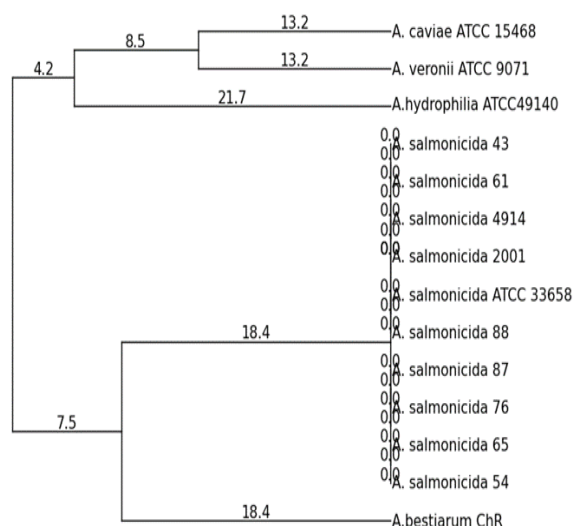
Для оценки генетического родства штаммов на основе анализа ВОХ-элементов электрофореграммы обрабатывали в программе PyElph 1.4, рассчитывая парные сходства с использованием коэффициента Дайса и метода UPGMA.

Результаты

Анализ полевых изолятов бактерий рода *Aeromonas*, выделенных из объектов ветеринарно-санитарного надзора (в том числе и от прудовой и речной рыбы), с использованием метода ВОХ-ПЦР позволил выявить выраженное генетическое разнообразие в рамках исследуемой выборки. Значения генетического расстояния, рассчитанные на основе Dice-коэффициента и кластеризованные методом UPGMA, варьировали в широком диапазоне – от полной идентичности (0,0) до значительной дивергенции (более 20 условных единиц). Это свидетельствует о сложной и неоднородной генетической структуре природных популяций аэромонад. На основании полученных данных все исследованные изоляты были разделены на три основных, филогенетически удалённых друг от друга, кластера, что соответствует принципиальным различиям в их экологической нише и, вероятно, эволюционной стратегии.

Генетическая мономорфность и клональная структура психрофильных штаммов *A. salmonicida*

Филогенетический анализ наглядно продемонстрировал принципиальное различие в генетической организации между психрофильными и мезофильными представителями рода.



Б

Рис. 1. (А) ВОХ-ПЦР-фингерпринт (1. *A. salmonicida* 2001, 2. *A. salmonicida* 4914, 3. *A. salmonicida* 61, 4. *A. salmonicida* 43, 5. *A. salmonicida* 54, 6. *A. salmonicida* 65, 7. *A. salmonicida* 76, 8. *A. salmonicida* 87, 9. *A. salmonicida* 88, 10. *A. hydrophila* ATCC 49140, 11. *A. veronii* ATCC 9071, 12. *A. bestiarum* ЧР, 13. *A. caviae* ATCC 15468, 14. *A. salmonicida* ATCC 33658, М. маркер длины ДНК); (Б) дендрограмма генетического родства штаммов *Aeromonas salmonicida*, полученная методом ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга (метод UPGMA, коэффициент Дайса)

Дендрограмма генетического родства штаммов *Aeromonas salmonicida* (рис. 1), полученная методом

ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга демонстрирует, что все исследованные штаммы *A. salmonicida* (полевые

изоляты 61, 4914, 2001, 43, 54, 65, 76, 87, 88), несмотря на разное происхождение и время выделения, продемонстрировали высокий уровень генетической гомологии, сформировав единый компактный кластер с нулевыми значениями генетической дистанции (0,0). Такая мономорфность ВОХ-профилей указывает на крайне низкий уровень внутривидового полиморфизма по анализируемым межмикросателлитным локусам. Данный феномен характерен для клональных популяций узкоспециализированных патогенов, чья эволюция происходит преимущественно за счёт вертикальной передачи и где генетический обмен (горизонтальный перенос генов) ограничен. Стабильность ВОХ-профиля у *A. salmonicida* может быть следствием его строгой адаптации к низким температурам и узкому кругу хозяев (преимущественно лососевым рыбам), что снижает селективное

давление к изменчивости и способствует консервации успешного генетического варианта.

Филогенетическая дивергенция и внутривидовой полиморфизм мезофильных видов бактерий рода Aeromonas

На основании данных, представленных в дендрограмме генетического родства штаммов *Aeromonas* spp. (рис. 2) можно считать, что в отличие от психрофильной группы, мезофильные виды (*A. hydrophila*, *A. veronii*, *A. caviae*) характеризовались выраженной филогенетической дивергенцией и не формировали единого компактного кластера. На дендрограмме они распределились в виде нескольких дискретных ветвей, что указывает на значительную эволюционную дистанцию как между разными видами, так и внутри них.

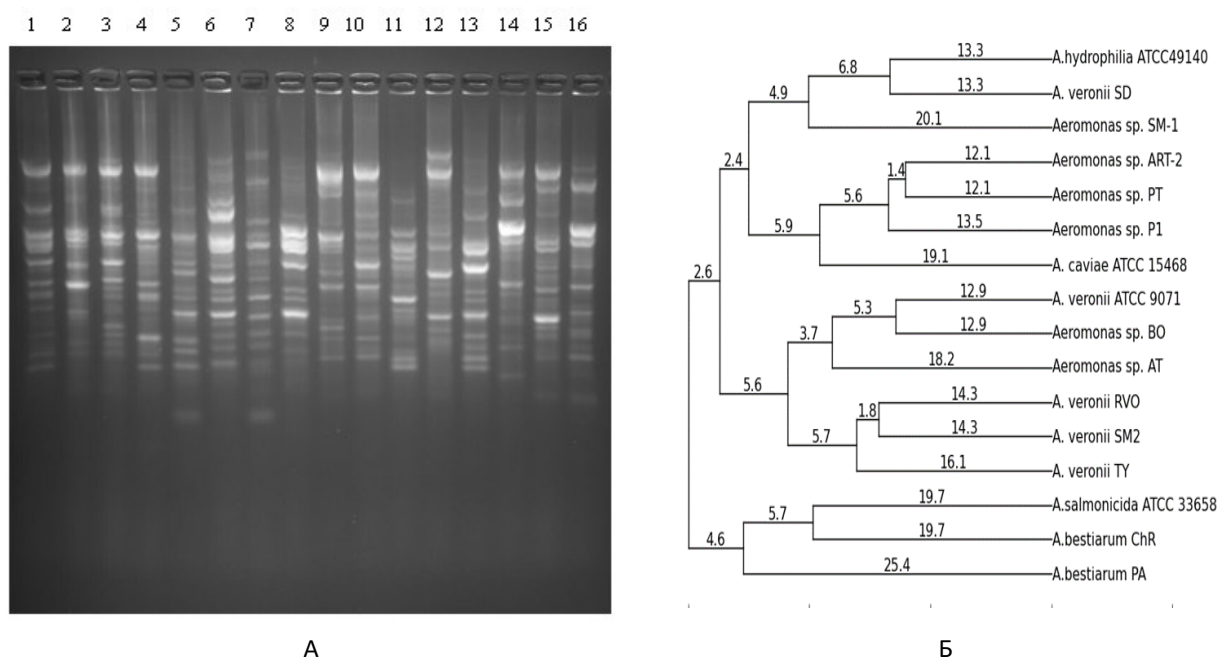


Рис. 2. (А) ВОХ-ПЦР-фингерпринт (1. *Aeromonas* sp. CM-1, 2. *A. bestiarum* ПА, 3. *Aeromonas* sp. БО, 4. *Aeromonas* sp. АТ, 5. *A. veronii* CM-2, 6. *A. veronii* PBO, 7. *A. veronii* TY, 8. *Aeromonas* sp. П1, 9. *Aeromonas* sp. ПТ, 10. *Aeromonas* sp. АРТ-2, 11. *A. veronii* SD, 12. *A. hydrophila* ATCC 49140, 13. *A. bestiarum* ЧР, 14. *A. veronii* ATCC 9071, 15. *A. caviae* ATCC 15468, 16. *A. salmonicida* ATCC 33658); (Б) Дендрограмма генетического родства штаммов *Aeromonas* spp., полученная методом ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга (метод UPGMA, коэффициент Дайса)

Наиболее показательной в плане внутривидового разнообразия оказалась группа *A. veronii*. Данный вид был представлен несколькими генетическими линиями:

первая линия, включающая штамм *A. veronii* SD, продемонстрировала неожиданно высокую степень сходства (дистанция 13,3) с референтным штаммом *A. hydrophila* ATCC 49140, сформировав с ним общий филогенетический блок (этот результат может указывать на возможные события горизонтального переноса генов между этими видами в природных условиях, либо на ограничения метода ВОХ-ПЦР в четком

разграничении некоторых генетически близких таксонов, что требует подтверждения методами секвенирования);

вторая, более типичная для *A. veronii* группа, объединила штаммы PBO и CM-2 (дистанция 14,1), к которой примыкал изолят *A. veronii* TY (дистанция 16,1); штамм *Aeromonas* sp. БО показал высокое сходство (дистанция 12,9) с референтным штаммом *A. veronii* ATCC 9071.

Положение нетипированных изолятов и их таксономическая интерпретация

Особый интерес представляют изоляты, предварительно идентифицированные только до уровня рода (*Aeromonas* sp.: SM-1, APT-2, ПТ, П1, АТ). На дендрограмме эти штаммы не образовали плотных кластеров ни с типичными *A. veronii*, ни с группой *A. salmonicida* / *A. bestiarum*, занимая обособленные ветви (например, *Aeromonas* sp. SM-1 с дистанцией 20,1 от ближайших соседей). Это может указывать на несколько возможных сценариев:

присутствие в выборке ещё не описанных или редко встречающихся видов рода *Aeromonas*;

существование гибридных или рекомбинантных форм, ВОХ-профили которых не соответствуют профилям эталонных штаммов;

значительную генетическую дивергенцию некоторых природных изолятов от известных референс-штаммов в пределах одного вида.

Обсуждение

Филогенетический анализ штаммов рода *Aeromonas*, выполненный на основе ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга, позволил оценить степень генетического родства между отдельными видами и выявить особенности их эволюционного расхождения. Полученные данные отражают различия в популяционной структуре психрофильных и мезофильных представителей рода.

Группа *A. salmonicida* на дендрограмме чётко обособлена, а её ближайшим филогенетическим родственником является вид *A. bestiarum* с дистанцией ветвления около 18,4 условных единиц. Несмотря на данное филогенетическое расстояние, оба вида локализуются в пределах одного крупного филогенетического блока. Это согласуется с историческими и современными молекулярно-таксономическими данными, согласно которым *A. bestiarum* первоначально описывался как *A. salmonicida subsp. bestiarum* на основе данных ДНК–ДНК-гибридизации, а последующие исследования по секвенированию генов 16S рРНК, *gyrB* и *groV* также подтверждали их близкое родство [14, 15]. Консолидация референтного штамма *A. salmonicida* ATCC 33658 и полевых изолятов в единый генетический блок свидетельствует о циркуляции стабильных, консервативных генетических линий данного вида в экосистемах, что является важным эпизоотологическим фактором.

Выявленные различия особенно отчётливо проявляются при анализе мезофильных видов. Так, гетерогенность внутри вида *A. veronii* подтверждает данные о его высокой эволюционной пластичности и способности занимать разнообразные экологические ниши. *A. veronii* известен как вид с широким хозяйным спектром (рыбы, моллюски, человек) и высокой частотой рекомбинационных событий, что способствует генетическому разнообразию [16, 17]. Полученные данные хорошо согласуются с результатами филогенетического анализа однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), выполненного T. Vieira, et al. (2025), где изоляты *A. veronii* также формировали

несколько рассредоточенных линий в отличие от более компактных клад *A. hydrophila* [18].

Данное наблюдение подчёркивает неполноту современных таксономических представлений о роде *Aeromonas* и указывает на необходимость применения многолокусного секвенирования (MLSA) или полногеномного анализа (WGS) для точной идентификации подобных изолятов. Выявленные закономерности имеют прямое практическое значение для системы молекулярно-эпидемиологического мониторинга в аквакультуре:

1. Высокая стабильность *A. salmonicida* облегчает его детекцию и эпизоотологическое отслеживание. Появление идентичного ВОХ-профиля в различных хозяйствах или водоёмах с высокой вероятностью указывает на распространение одного и того же клона и позволяет проследить пути заноса инфекции.

2. Значительный полиморфизм мезофильных видов, особенно *A. veronii*, осложняет их эпизоотологическое картирование, но одновременно предоставляет инструмент для высокоразрешающего типирования. ВОХ-ПЦР позволяет дифференцировать отдельные штаммы внутри вида, что имеет ключевое значение для установления источника вспышки, изучения микробной динамики в водоёме и оценки эффективности ветеринарно-санитарных мероприятий.

3. Способность метода выявлять нетипированные и генетически удалённые изоляты делает его эффективным инструментом первичного скрининга для обнаружения новых или атипичных патогенов до проведения более трудоёмких исследований.

Применение ВОХ-ПЦР подтвердило свою эффективность для характеристики популяционной структуры бактерий рода *Aeromonas*, выявив два противоположных эволюционных сценария: консервативно-клональный - для специализированных психрофильных патогенов и пластично-дивергентный - для эврибионтных мезофильных видов. Полученные данные формируют научную основу для разработки и совершенствования стратегий молекулярного надзора за аэромонадными инфекциями в аквакультуре.

Заключение

Метод ВОХ-ПЦР-фингерпринтинга подтвердил свою эффективность и высокую разрешающую способность для анализа генетического разнообразия и филогенетической структуры бактерий рода *Aeromonas*. Метод позволил чётко дифференцировать как виды, так и штаммы внутри видов, обеспечивая информативную основу для молекулярного типирования.

В результате исследования выявлены две принципиально различные модели генетической организации у исследуемых представителей рода:

Психрофильные штаммы *A. salmonicida* характеризуются высокой степенью генетической консервативности и однородности. Они формируют единый мономорфный кластер с нулевыми генетическими дистанциями, что свидетельствует об их клональной

структуре и адаптации как узкоспециализированных патогенов рыб.

Мезофильные виды (*A. veronii*, *A. hydrophila*, *A. caviae*) демонстрируют выраженную филогенетическую дивергенцию и значительный внутривидовой полиморфизм. Особенно высокая генетическая гетерогенность свойственна виду *A. veronii*, изоляты которого формируют несколько дискретных линий, что отражает их эволюционную пластичность и способность занимать разнообразные экологические ниши.

Установлена четкая филогенетическая близость между *A. salmonicida* и *A. bestiarum*, что подтверждает данные ранее проведенных таксономических исследований на основе секвенирования и ДНК-гибридизации. Это указывает на циркуляцию стабильных генетических линий в пределах данной группы.

Обнаружены изоляты, нетипированные до вида (*Aeromonas* sp.), занимающие обособленные позиции на дендрограмме. Это указывает на возможное наличие в природных популяциях неидентифицированных генетических вариантов или рекомбинантных форм, чья таксономия требует уточнения с помощью методов полногеномного анализа.

Полученные данные имеют практическую значимость для системы молекулярно-эпидемиологического мониторинга в аквакультуре. Стабильность BOX-профилей у *A. salmonicida* облегчает отслеживание конкретных патогенных клонов, в то время как высокий полиморфизм мезофильных видов позволяет проводить высокоразрешающее типирование для установления источников инфекции и путей её распространения в рыбоводческих хозяйствах и естественных водоёмах.

Применение BOX-ПЦР является ценным инструментом для изучения популяционной биологии аэромонад, оценки генетических рисков в аквакультуре и разработки научно обоснованных мер контроля инфекционных заболеваний.

Литература

1. The Genus *Aeromonas* in Aquaculture: A Comprehensive Review of Prevalence, Virulence, and Antibiotic Resistance With an Emphasis on Key Pathogenic Species / L. T. Tao, D. P. Gao, Y. L. Liu, et al. // *Reviews in Aquaculture*. 2026. Vol. 18. No. 1. P. e70097.
2. Isolation, identification and characteristics of *Aeromonas veronii* from diseased crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) / F. Chen, J. Sun, Z. Han, et al. // *Frontiers in microbiology*. 2019. Vol. 10. P. 2742.
3. Multidrug resistant *Aeromonas* spp. isolated from zebrafish (*Danio rerio*): Antibigram, antimicrobial resistance genes and class 1 integron gene cassettes / S. Hossain, P. S. Dahanayake, B. C. J. De Silva, et al. // *Letters in applied microbiology*. 2019. Vol. 68. No. 5. P. 370-377.
4. Janda J. M., Abbott S. L. The genus *Aeromonas*: taxonomy, pathogenicity, and infection // *Clinical microbiology reviews*. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 35-73.

5. *Aeromonas* and human health disorders: clinical approaches / R.B.G. Pessoa, W.F.D. Oliveira, M.T.D.S. Correia, et al. // *Frontiers in microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 868890.

6. *Aeromonas hydrophila* clinical and environmental ecotypes as revealed by genetic diversity and virulence genes/ MG. Aguilera-Arreola, C. Hernández-Rodríguez, G. Zúñiga, et al. // *FEMS Microbiology Letters*. 2005. Vol. 242. No. 2. P. 231-240.

7. BOX-PCR is an adequate tool for typing *Aeromonas* spp / M. Tacão, A. Alves, M.J. Saavedra, A. Correia // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2005. Vol. 88. No. 2. P. 173-179.

8. Evaluation of BOX-PCR and ERIC-PCR as molecular typing tools for pathogenic *Leptospira* / L. M. Bilung, C.F. Pui, L. Su'ut, et al. // *Disease markers*. 2018. Vol. 2018. No. 1. P. 1351634.

9. Studies on ulcerative disease caused by *Aeromonas caviae*-like bacterium in Indian catfish, *Clarias batrachus* (Linn) / J. Thomas, N. Madan, K.S. N. Nambi, et al. // *Aquaculture*. 2013. Vol. 376. P. 146-150.

10. Identification and virulence properties of *Aeromonas veronii* bv. *sobria* isolates causing an ulcerative syndrome of loach *Misgurnus anguillicaudatus* / M. Zhu, X.R. Wang, J. Li, et al. // *Journal of Fish Diseases*. 2016. Vol. 39. No. 6. P. 777-781.

11. *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* strains isolated from Chinese freshwater fish contain a novel genomic island and possible regional-specific mobile genetic elements profiles / M. Long, T.K. Nielsen, J. J. Leisner, et al. // *FEMS Microbiology Letters*. 2016. Vol. 363. No. 17. P. fnw190.

12. Outcome of co-infection with opportunistic and multidrug resistant *Aeromonas hydrophila* and *A. veronii* in zebrafish: Identification, characterization, pathogenicity and immune responses / H. P. S. U. Chandrarathna, C. Nikapitiya, S.H. S. Dananjaya, et al. // *Fish & shellfish immunology*. 2018. Vol. 80. P. 573-581.

13. Bacterial and parasite co-infection in Mexican golden trout (*Oncorhynchus chrysogaster*) by *Aeromonas bestiarum*, *Aeromonas sobria*, *Plesiomonas shigelloides* and *Ichthyobodo necator* / M. A. Fuentes-Valencia, J. L. Osornio-Esquivel, C. A. Martínez Palacios, et al. // *BMC Veterinary Research*. 2022. Vol. 18. No. 1. P. 137.

14. Phenotypic, genotypic, and phylogenetic discrepancies to differentiate *Aeromonas salmonicida* from *Aeromonas bestiarum*/ A.J. Martínez-Murcia, L. Soler, M.J. Saavedra, et al. // *International Microbiology*. 2005. Vol. 8. No. 4. P. 259-269.

15. Determination of microbial diversity of *Aeromonas* strains on the basis of multilocus sequence typing, phenotype, and presence of putative virulence genes / M.E. Martino, L. Fasolato, F. Montemurro, et al. // *Applied and environmental microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 14. P. 4986-5000.

16. Prevalence and genetic diversity of *Aeromonas veronii* isolated from aquaculture systems in the Poyang

Lake area, China / X. Xu, H. Fu, G. Wan, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 1042007.

17. Comparative and evolutionary genomics of isolates provide insight into the pathoadaptation of *Aeromonas* / E. Talagrand-Reboul, S. M. Colston, J. Graf, et al. // *Genome biology and evolution*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 535-552.

18. Genomic and proteomic identification of *Aeromonas* isolates from diverse sources: Comparative performance of WGS and MALDI-TOF MS in species-level resolution / T. Vieira, G. L. Costa, A. Y. Yamada, et al. // *Frontiers in Bacteriology*. Vol. 4. P. 1708292.

References

1. The Genus *Aeromonas* in Aquaculture: A Comprehensive Review of Prevalence, Virulence, and Antibiotic Resistance With an Emphasis on Key Pathogenic Species / L. T. Tao, D. P. Gao, Y. L. Liu, et al. // *Reviews in Aquaculture*. 2026. Vol. 18. No. 1. P. e70097.

2. Isolation, identification and characteristics of *Aeromonas veronii* from diseased crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) / F. Chen, J. Sun, Z. Han, et al. // *Frontiers in microbiology*. 2019. Vol. 10. P. 2742.

3. Multidrug resistant *Aeromonas* spp. isolated from zebrafish (*Danio rerio*): Antibigram, antimicrobial resistance genes and class 1 integron gene cassettes / S. Hossain, P. S. Dahanayake, B. C. J. De Silva, et al. // *Letters in applied microbiology*. 2019. Vol. 68. No. 5. P. 370-377.

4. Janda J. M., Abbott S. L. The genus *Aeromonas*: taxonomy, pathogenicity, and infection // *Clinical microbiology reviews*. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 35-73.

5. *Aeromonas* and human health disorders: clinical approaches / R.B.G. Pessoa, W.F.D. Oliveira, M.T.D.S. Correia, et al. // *Frontiers in microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 868890.

6. *Aeromonas hydrophila* clinical and environmental ecotypes as revealed by genetic diversity and virulence genes/ MG. Aguilera-Arreola, C. Hernández-Rodríguez, G. Zúñiga, et al. // *FEMS Microbiology Letters*. 2005. Vol. 242. No. 2. P. 231-240.

7. BOX-PCR is an adequate tool for typing *Aeromonas* spp / M. Tacão, A. Alves, M.J. Saavedra, A. Correia // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2005. Vol. 88. No. 2. P. 173-179.

8. Evaluation of BOX-PCR and ERIC-PCR as molecular typing tools for pathogenic *Leptospira* / L. M. Bilung, C.F. Pui, L. Su'ut, et al. // *Disease markers*. 2018. Vol. 2018. No. 1. P. 1351634.

9. Studies on ulcerative disease caused by *Aeromonas caviae*-like bacterium in Indian catfish, *Clarias batrachus* (Linn) / J. Thomas, N. Madan, K.S. N. Nambi, et al. // *Aquaculture*. 2013. Vol. 376. P. 146-150.

10. Identification and virulence properties of *Aeromonas veronii* bv. *sobria* isolates causing an ulcerative syndrome of loach *Misgurnus anguillicaudatus* / M. Zhu, X.R. Wang, J. Li, et al. // *Journal of Fish Diseases*. 2016. Vol. 39. No. 6. P. 777-781.

11. *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* strains isolated from Chinese freshwater fish contain a

novel genomic island and possible regional-specific mobile genetic elements profiles / M. Long, T.K. Nielsen, J. J. Leisner, et al. // *FEMS Microbiology Letters*. 2016. Vol. 363. No. 17. P. fnw190.

12. Outcome of co-infection with opportunistic and multidrug resistant *Aeromonas hydrophila* and *A. veronii* in zebrafish: Identification, characterization, pathogenicity and immune responses / H. P. S. U. Chandrarathna, C. Nikapitiya, S.H. S. Dananjaya, et al. // *Fish & shellfish immunology*. 2018. Vol. 80. P. 573-581.

13. Bacterial and parasite co-infection in Mexican golden trout (*Oncorhynchus chrysogaster*) by *Aeromonas bestiarum*, *Aeromonas sobria*, *Plesiomonas shigelloides* and *Ichthyobodo necator* / M. A. Fuentes-Valencia, J. L. Osornio-Esquivel, C. A. Martínez Palacios, et al. // *BMC Veterinary Research*. 2022. Vol. 18. No. 1. P. 137.

14. Phenotypic, genotypic, and phylogenetic discrepancies to differentiate *Aeromonas salmonicida* from *Aeromonas bestiarum*/ A.J. Martínez-Murcia, L. Soler, M.J. Saavedra, et al. // *International Microbiology*. 2005. Vol. 8. No. 4. P. 259-269.

15. Determination of microbial diversity of *Aeromonas* strains on the basis of multilocus sequence typing, phenotype, and presence of putative virulence genes / M.E. Martino, L. Fasolato, F. Montemurro, et al. // *Applied and environmental microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 14. P. 4986-5000.

16. Prevalence and genetic diversity of *Aeromonas veronii* isolated from aquaculture systems in the Poyang Lake area, China / X. Xu, H. Fu, G. Wan, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 1042007.

17. Comparative and evolutionary genomics of isolates provide insight into the pathoadaptation of *Aeromonas* / E. Talagrand-Reboul, S. M. Colston, J. Graf, et al. // *Genome biology and evolution*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 535-552.

18. Genomic and proteomic identification of *Aeromonas* isolates from diverse sources: Comparative performance of WGS and MALDI-TOF MS in species-level resolution / T. Vieira, G. L. Costa, A. Y. Yamada, et al. // *Frontiers in Bacteriology*. Vol. 4. P. 1708292.

Оценка функциональной экспрессии цитокинов IL-10 и IL-22 в пробиотических штаммах *Lactobacillus spp.*

В. С. Самойленко✉, кандидат ветеринарных наук, заведующий кафедрой «Зоология и паразитология» медико-биологического факультета

А. А. Лапина, студент медико-биологического факультета

С. Д. Подставкина, студент медико-биологического факультета

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355032, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

✉victor_samoylenko_26@mail.ru

Резюме. В настоящее время наблюдается растущий интерес к разработке рекомбинантных пробиотических штаммов, способных к направленной доставке и локальной экспрессии терапевтических молекул в желудочно-кишечном тракте. Исследование посвящено созданию и функциональной характеристике штаммов *Lactobacillus spp.*, экспрессирующих иммуномодулирующие цитокины IL-10 и IL-22 с использованием плазмидного вектора pLacDualIL10/IL22. Трансформацию бактерий осуществляли методом электропорации с последующей селекцией устойчивых клонов. Копийность плазмиды определяли методом количественной ПЦР, стабильность — при пассировании без селективного давления в течение 50 поколений. Экспрессию белков анализировали с помощью SDS-PAGE, вестерн-блоттинга и ELISA. Функциональную активность IL-10 оценивали по способности ингибировать продукцию TNF- α , а IL-22 — по индукции фосфорилирования STAT3 в клеточных культурах. Количественная ПЦР, электрофорез и вестерн-блоттинг подтвердили высокий уровень экспрессии и специфичность целевых белков с молекулярными массами ~18 кДа и ~20 кДа соответственно. Иммуноферментный анализ (ELISA) показал значительный уровень накопления цитокинов в культуральной среде: 420 $\pm$ 35 нг/мл для IL-10 и 510 $\pm$ 40 нг/мл для IL-22. Функциональная активность белков была подтверждена *in vitro*: IL-10 эффективно подавлял продукцию TNF- α , а IL-22 активировал фосфорилирование STAT3. Анализ сегрегационной стабильности продемонстрировал, что плазмидный вектор сохранялся в >95 % клеток после 50 поколений в отсутствие селективного давления. Полученные данные демонстрируют перспективность созданных рекомбинантных штаммов для применения в качестве основы для пробиотических препаратов нового поколения, предназначенных для терапии хронических воспалительных заболеваний кишечника у сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: рекомбинантные пробиотические штаммы, иммуномодулирующие цитокины, *Lactobacillus spp.*, экспрессия, целевые белки, пробиотические препараты

Для цитирования: Самойленко В. С., Лапина А. А., Подставкина С. Д. Оценка функциональной экспрессии цитокинов IL-10 и IL-22 в пробиотических штаммах *Lactobacillus spp.* // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 106-112. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-106-112

Evaluation of the functional expression of il-10 and il-22 cytokines in probiotics strains of *Lactobacillus spp.*

V. S. Samoylenko✉, **A. A. Lapina**, **S. D. Podstavkina**

FSAEI HE North Caucasus Federal University

355032, Stavropol Krai, Stavropol, Pushkin St., 1.

✉victor_samoylenko_26@mail.ru

Abstract. There is a growing interest in the development of recombinant probiotic strains capable of targeted delivery and local expression of therapeutic molecules in the gastrointestinal tract. This study focused on creation and functional characterization of *Lactobacillus spp.* strains expressing the immunomodulatory cytokines IL-10 and IL-22 using the pLacDualIL10/IL22 plasmid vector. Bacterial transformation was performed by electroporation, followed by selection of resistant clones. Plasmid copy number was determined by quantitative PCR and stability was assessed by passaging without selective pressure for 50 generations. Protein expression was analyzed by SDS-PAGE, Western blotting and ELISA. The functional activity of IL-10 was assessed by its ability to inhibit TNF- α production and that of IL-22 by inducing STAT3 phosphorylation in cell cultures. Quantitative PCR, electrophoresis and Western blotting confirmed the high expression level and specificity of the target proteins with molecular masses of ~18 kDa and ~20 kDa, respectively. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) revealed a significant level of cytokine accumulation in the culture medium: 420 $\pm$ 35 ng/ml for IL-10 and 510 $\pm$ 40 ng/ml for IL-22. The functional activity of the proteins was confirmed *in vitro*: IL-10 effectively suppressed TNF- α production, while IL-22 activated STAT3 phosphorylation. Segregation stability analysis demonstrated that the plasmid vector was retained in >95% of cells after 50 generations in the absence of selective pressure. These data demonstrate the potential of the generated recombinant strains for use as the basis for next-generation probiotic preparations for the treatment of chronic inflammatory bowel diseases of farm animals.

Keywords: recombinant probiotic strains, immunomodulatory cytokines, *Lactobacillus* spp., expression, target proteins, probiotic preparations

For citation: Samoylenko V. S., Lapina A. A., Podstavkina S.D. Evaluation of the functional expression of il-10 and il-22 cytokines in probiotics strains of *Lactobacillus* spp. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026;1(73): 106-112 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-106-112

Введение

Проблема воспалительных и иммунодефицитных состояний у молодняка сельскохозяйственных животных остается одной из актуальных задач ветеринарии. Пробиотики, в частности бактерии рода *Lactobacillus*, давно признаны ключевыми компонентами для поддержания гомеостаза желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и модуляции иммунного ответа хозяина [1, 2]. Их способность к адгезии к кишечному эпителию, конкуренции с патогенами и продукции биоактивных метаболитов лежит в основе их благотворного воздействия [3]. Однако традиционные пробиотические штаммы зачастую оказывают опосредованное и не всегда достаточно сильное иммуномодулирующее действие, что ограничивает их терапевтическую эффективность при хронических воспалительных заболеваниях кишечника [4, 5].

В поисках новых стратегий лечения все большее внимание привлекает концепция бактериальной терапии и создание рекомбинантных пробиотиков, способных целенаправленно доставлять и локально экспрессировать терапевтические молекулы в очаге воспаления [6]. Среди ключевых регуляторов иммунного ответа в кишечнике особое место занимают противовоспалительный цитокин интерлейкин-10 (IL-10) и цитокин барьерной защиты интерлейкин-22 (IL-22). IL-10 является мощным противовоспалительным агентом, подавляющим синтез провоспалительных цитокинов (например, TNF- α , IL-1 β , IL-6) и ограничивающим патологический иммунный ответ [7, 8, 9]. Дефицит IL-10 или нарушение его сигнального пути напрямую ассоциированы с развитием тяжелых форм воспалительных заболеваний кишечника [10, 11]. IL-22 играет критическую роль в защите и регенерации слизистых оболочек: он стимулирует эпителиальные клетки к продукции антимикробных пептидов (дефензинов), укрепляя тем самым кишечный барьер [12].

Несмотря на доказанную терапевтическую ценность IL-10 и IL-22, их системное введение в клинической практике сопряжено с серьезными побочными эффектами вследствие плейотропного действия этих цитокинов [13, 14]. Это обуславливает необходимость разработки систем для их локальной, таргетной доставки непосредственно в кишечник. Попытки применения пробиотических штаммов *Lactobacillus* в качестве «биологических курьеров» для доставки цитокинов демонстрируют значительный потенциал [15]. Однако естественная способность лактобацилл к продукции этих иммуномодуляторов крайне ограничена или отсутствует.

Существующие стратегии генетической модификации включают интеграцию целевых генов в бактериальный хромосом или использование плазмидных

векторов [16, 17]. Хромосомная интеграция обеспечивает стабильность наследования, но часто приводит к низкому уровню экспрессии. В отличие от этого использование мульткопийных плазмидных векторов позволяет достичь высокого уровня продукции целевого белка, что является критически важным для достижения терапевтического порога концентрации цитокинов [18, 19]. Однако данный подход сталкивается с вызовами, такими как необходимость обеспечения стабильной репликации плазмиды *in vivo* без селективного давления антибиотиков, а также контроль над непреднамеренной горизонтальной передачей генов [20].

Материалы и методы

На базе Геномного Центра Северо-Кавказского Федерального университета, в период с 2024 по 2025 гг. осуществляли основные исследования по функциональной экспрессии иммуномодулирующих цитокинов в пробиотических штаммах *Lactobacillus* spp с использованием рекомбинантного плазмидного вектора pLacDualIL10/IL22.

В качестве объектов исследования использовали штаммы пробиотических бактерий *Lactobacillus* spp. Для генерации рекомбинантных штаммов применяли двупромоторный плазмидный вектор pLacDualIL10/IL22, обеспечивающий возможность коэкспрессии иммунокорректирующих белков IL-10 и IL-22 в выбранных штаммах.

Трансформация бактерий осуществляли методом электропорации клеток, находящихся в логарифмической фазе роста. Для получения стабильных рекомбинантных клеточных линий использовали селекцию на жидких и твердых питательных средах, содержащих антибиотики эритромицин (50 мкг/мл) и хлорамфеникол (30 мкг/мл). Клетки, успешно включившие плазмидный вектор, отбирали и использовали для дальнейших экспериментов.

Для оценки количества копий рекомбинантного вектора в бактериальных клетках применяли количественный ПЦР с использованием специфичных праймеров к последовательностям IL-10 и IL-22. Метод позволял количественно определить число плазмид на одну клетку и оценить репликационный потенциал в различных условиях.

Стабильность рекомбинантного вектора определялась путем последовательного пассирования клеток на неселективной среде в течение 50 поколений. Каждые 10 поколений проводился подсчет доли клеток, содержащих плазмиду, путем повторной селекции на антибиотикосодержащих средах. Результаты выражались в процентах плазмид-содержащих клеток относительно общей численности.

Экспрессию белков IL-10 и IL-22 анализировали комплексно: визуализацию белков проводили

методом SDS-PAGE, позволяющим оценить молекулярную массу и относительное количество синтезированных белков; подтверждение специфичности белков выполняли методом вестерн-блоттинга с использованием моноклональных антител против IL-10 и IL-22; количественное определение уровня продукции белков проводили с помощью иммуноферментного анализа (ELISA).

Функциональную активность IL-10 оценивали через ингибирование продукции провоспалительного цитокина TNF- α в культурах клеток млекопитающих *in vitro*. Для IL-22 проводили тест на стимуляцию фосфорилирования STAT3, отражающий способность белка активировать сигнальный путь, характерный для его физиологической функции.

Результаты

Генерация и селекция рекомбинантных штаммов

В результате проведенной трансформации штаммов *Lactobacillus spp.* плазмидным вектором pLacDualIL10/IL22 методом электропорации были получены устойчивые к антибиотикам клоны. Селекция на питательных средах, содержащих эритромицин (50 мкг/мл) и хлорамфеникол (30 мкг/мл), показала высокую эффективность трансформации. Все последующие анализы проводились с использованием стабильных клеточных линий, отобранных на данном этапе.

Анализ стабильности, копийности и биологической активности плазмидного вектора в трансформированных штаммах *Lactobacillus spp.*

Анализ сегрегационной стабильности рекомбинантной плазмиды pLacDualIL10/IL22 при пассировании в условиях отсутствия селективного давления (на неселективной среде) в течение 50 генераций продемонстрировал ее исключительно высокую стабильность в штаммах-хозяевах *Lactobacillus spp.*

Определение процента плазмид-позитивных колоний осуществлялось методом отбора на селективных средах и подтверждалось колониальной ПЦР. Уже после 10 поколений в популяции сохранялось более 97 % плазмидсодержащих клеток, а к 50 поколению этот показатель составил $95 \pm 1,5$ %, что свидетельствует о низкой частоте потери плазмиды в отсутствие отбора (рис. 1).

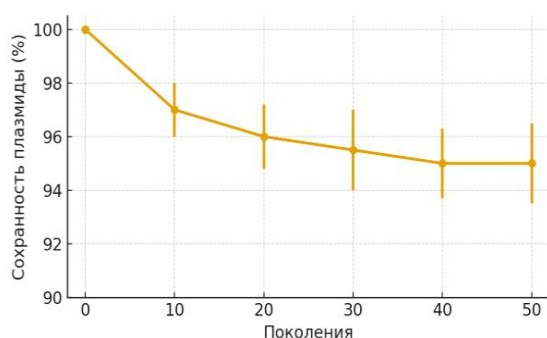


Рис.1. Стабильность pLacDualIL10/IL22 при пассировании

Анализ сегрегационной стабильности рекомбинантной плазмиды pLacDualIL10/IL22 (рис.1) продемонстрировал её исключительно высокую сохранность в популяции клеток-хозяев в условиях длительного культивирования без селективного давления. Кривая, отражающая динамику доли плазмид-позитивных клеток в зависимости от числа генераций, характеризуется отсутствием выраженного негативного показателя. Ключевым результатом является то, что даже после 50 поколений уровень сохранения плазмиды превышает 95%.

Определение количества копий плазмиды на бактериальную клетку методом количественной ПЦР установило, что вектор pLacDualIL10/IL22 поддерживается в диапазоне от 20 до 50 копий на хромосомный эквивалент, что характеризует его как высококопийный.

Полученные данные однозначно свидетельствуют о низкой скорости потери и высокой сегрегационной стабильности векторной конструкции. Это подтверждает принципиальную возможность её практического применения в пробиотических штаммах без необходимости поддержания с помощью антибиотиков, что является критически важным требованием для их терапевтического использования.

Подтверждение экспрессии и количественный анализ целевых белков

Комплексный анализ экспрессии рекомбинантных белков подтвердил их успешный синтез в клетках *Lactobacillus spp.*

SDS-PAGE анализ электрофореза белковых экстрактов трансформированных клеток выявил дополнительные полосы с молекулярной массой, соответствующей прогнозируемой массе зрелых белков IL-10 (~18 кДа) и IL-22 (~20 кДа), которые отсутствовали в контрольном нетрансформированном штамме (рис. 2).

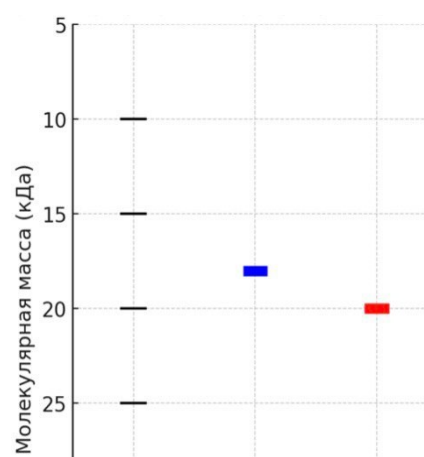


Рис. 2. Схематическое SDS-PAGE распознавание экспрессируемых белков IL-10 (~18 кДа) и IL-22 (~20 кДа)

Анализ электрофореграммы, представленной на рис. 2, демонстрирует следующие результаты. В дорожке, содержащей маркер молекулярных масс,

визуализируются стандартные белковые полосы, соответствующие известным молекулярным массам.

В образцах, содержащих рекомбинантные белки, наблюдаются отчетливые дискретные полосы: для IL-10 на уровне 18 кДа, для IL-22 на уровне 20 кДа.

Полученные молекулярные массы полностью соответствуют прогнозируемым теоретическим значениям для зрелых форм данных цитокинов. Отсутствие неспецифических полос и продуктов деградации в соответствующих дорожках свидетельствует о высокой специфичности экспрессии и стабильности целевых рекомбинантных белков в клетках-продуцентах.

При визуальной сравнительной оценке можно отметить, что интенсивность сигнала полосы, соответствующей IL-22, превышает интенсивность сигнала полосы IL-10, что может указывать на более высокий уровень накопления данного белка в исследуемых условиях экспрессии.

Вестерн-блоттинг с использованием специфичных моноклональных антител к IL-10 и IL-22 подтвердил наличие специфичных сигналов на тех же уровнях, что окончательно доказало экспрессию целевых белков. Плотностный анализ показал, что интенсивность сигнала IL-22 на 15...20 % выше по сравнению с IL-10.

Количественный анализ уровня экспрессии рекомбинантных цитокинов методом иммуноферментного анализа (ELISA) выявил значительную продукцию как IL-10, так и IL-22 в культуральных супернатантах трансформированных штаммов (рис. 3 3). Концентрация IL-10 достигала 420 ± 35 нг/мл, в то время как уровень экспрессии IL-22 был достоверно выше, составляя 510 ± 40 нг/мл. (значения указаны как среднее $\pm$ SD).

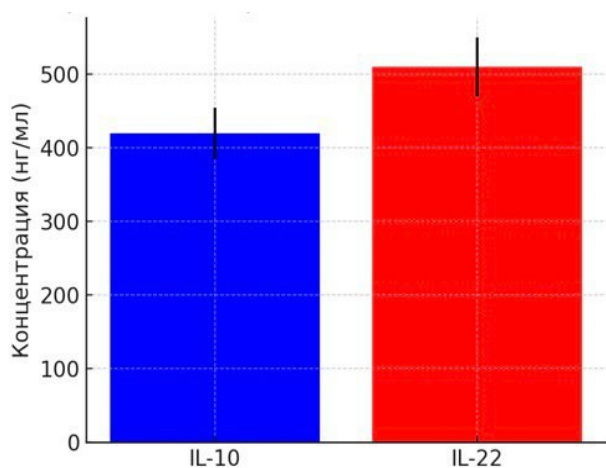


Рис. 3. Результаты ELISA – уровни экспрессии IL-10 и IL-22

Статистический анализ подтвердил, что разница в уровнях экспрессии между цитокинами является значимой ($p < 0.05$), при этом продукция IL-22 превышала таковую для IL-10 на 21,4 %. Низкие значения стандартного отклонения свидетельствуют о высокой

воспроизводимости результатов между независимыми биологическими повторами.

Для подтверждения функциональной активности рекомбинантных белков были проведены дополнительные исследования *in vitro*. Показано, что очищенный IL-10 достоверно подавлял секрецию провоспалительного цитокина TNF- α в культуре клеток макрофагов на ~92 % по сравнению с контролем. Параллельно, рекомбинантный IL-22 индуцировал фосфорилирование транскрипционного фактора STAT3 на уровне ~96 % в клетках кишечного эпителия, демонстрируя его способность активировать физиологический сигнальный путь.

Полученные данные комплексно подтверждают не только высокий уровень экспрессии целевых цитокинов, но и сохранение их полной биологической активности. Сочетание этих результатов с доказанной сегрегационной стабильностью плазмиды pLacDualIL10/IL22 и специфичностью экспрессии позволяет рассматривать разработанную систему в качестве перспективной платформы для создания пробиотических препаратов ветеринарного назначения с направленной иммуномодулирующей активностью.

Все ключевые результаты функциональной валидации представлены в таблице 1. Она включает данные по наличию полос в SDS-PAGE, относительной интенсивности сигналов при вестерн-блоттинге, концентрации цитокинов по ELISA, а также показатели копийности плазмиды, её стабильности при пассировании и эффективность трансформации.

Согласно данным, представленным в таблице 1, SDS-PAGE и вестерн-блот показали наличие целевых белков на ожидаемых позициях (~18 кДа для IL-10 и ~20 кДа для IL-22) и высокую специфичность сигналов; плотностный анализ полос (денсиметрия) демонстрирует, что относительная интенсивность IL-10 составляет примерно 0,82...0,85 по сравнению с IL-22 (нормирован к 1,00), что согласуется с ELISA-данными, где концентрация IL-22 (510 ± 40 нг/мл) превышает IL-10 (420 ± 35 нг/мл) на 90 нг/мл, или на 21,4 %. Количественные иммунореактивные измерения (ELISA) дают уверенные значения в сотнях нг/мл, что говорит о высокой продуктивности системы в культивате. Функциональные тесты подтверждают сохранение биологической активности синтезированных белков: IL-10 подавляет продукцию TNF- α на уровне в среднем 94 ± 2 % относительно эталонного реагента, а IL-22 индуцирует фосфорилирование STAT3 на уровне 96 ± 2 %, что свидетельствует о сохранении функциональной структуры цитокинов после экспрессии в *Lactobacillus*. Показатели копийности находятся в диапазоне 20...50 копий на клетку, что обеспечивает достаточный транскрипционный потенциал для высокой продукции белков, и согласуется с высокой эффективностью трансформации (порядок 1×10^6 КОЕ/нг ДНК по протоколу электропорации). Стабильность плазмиды при пассировании без селекции оказалась высокой: исходно 100 % плазмид-позитивных клеток и ~95 % после 50 поколений

(определение — подсчёт колоний на селективных средах и/или колониальная ПЦР), что делает

конструкцию пригодной для прикладного использования в пробиотических препаратах.

Таблица 1. Сводная таблица количественных показателей функциональной валидации pLacDualIL10/IL22 в трансформированных штаммах *Lactobacillus spp.*

Показатель	Метод/единицы	IL-10	IL-22
Наличие полос (SDS-PAGE)	качественно / позиция (кДа)	~18 кДа	~20 кДа
Плотность полос	денситометрия	0,82±0,07	1±0,08
Сигнал (вестерн-блоттинг)	денситометрия	0,85±0,06	1±0,05
Концентрация (ELISA)	нг/мл	420±35	510±40
Разница в концентрации	% (отношение к IL-10)	-	+21,4
Копийность плазмиды (ПЦР)	копий/клетку	20-50	20-50
Стабильность после пассирования	% плазмид-позитивных колоний	95	95
Эффективность трансформации	КОЕ/нг ДНК	1,0×10 ⁶	1,0×10 ⁶

Обсуждение

Была проведена комплексная оценка рекомбинантного плазмидного вектора pLacDualIL10/IL22, сконструированного для коэкспрессии иммуномодулирующих цитокинов IL-10 и IL-22 в пробиотических штаммах *Lactobacillus spp.* Полученные результаты согласуются с современными представлениями о ключевой роли IL-10 и IL-22 в регуляции мукозального иммунитета. Известно, что IL-10 ограничивает избыточные воспалительные реакции, тогда как IL-22 поддерживает барьерную функцию эпителия и способствует регенерации тканей; их согласованное действие рассматривается как важный механизм поддержания иммунного гомеостаза слизистых оболочек [2, 5]. В этой связи коэкспрессия обоих цитокинов в одном пробиотическом штамме представляется обоснованной стратегией, потенциально обеспечивающей более комплексный и физиологичный иммуномодулирующий эффект по сравнению с системами, основанными на экспрессии одного медиатора.

Ранее показано, что пробиотики способны усиливать продукцию эндогенного IL-10 и снижать выраженность воспаления [4, 15], однако такие эффекты носят опосредованный характер и зависят от состояния макроорганизма. В отличие от этого подхода, реализованная в работе система обеспечивает прямую доставку рекомбинантных цитокинов. При этом в исследованиях, посвящённых созданию IL-22-продуцирующих штаммов *Lactobacillus reuteri*, отмечались проблемы стабильности и вариабельности экспрессии [6]. Продемонстрированная высокая плазмидная стабильность без селекционного давления и воспроизводимые уровни продукции белков свидетельствуют об оптимальной архитектуре экспрессионной конструкции и согласуются с данными о значении регуляторных элементов и копииности плазмид для устойчивой экспрессии [17, 18].

Функциональная активность синтезированных цитокинов подтверждена подавлением продукции TNF-α под действием IL-10, что соответствует его установленной противовоспалительной роли [5, 7], а также индукцией фосфорилирования STAT3 под влиянием IL-22, согласующейся с данными о его

цитопротективных свойствах и эффективности IL-22-продуцирующих пробиотиков в экспериментальных моделях [12]. В отличие от ранее описанных моноцитокиновых систем, представленная конструкция обеспечивает одновременную продукцию двух функционально комплементарных медиаторов без утраты их биологической активности.

В целом полученные данные подтверждают возможность создания стабильной и функционально активной пробиотической платформы для комбинированной доставки IL-10 и IL-22. Это расширяет существующие подходы к разработке рекомбинантных пробиотиков «второго поколения» [12, 19] и формирует научно обоснованный фундамент для создания иммуномодулирующих биопрепаратов с направленным противовоспалительным и барьер-протективным действием.

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало успешную функциональную валидацию рекомбинантного плазмидного вектора pLacDualIL10/IL22, созданного для коэкспрессии иммуномодулирующих цитокинов IL-10 и IL-22 в пробиотических штаммах *Lactobacillus spp.* Плазида проявила высокую стабильность при длительном пассировании без селекционного давления: даже после пятидесяти поколений уровень плазмид-позитивных клеток сохранялся на уровне около 95%, что подтверждает её пригодность для практического использования в условиях, когда невозможно применение антибиотиков-селекторов.

Экспериментальные данные SDS-PAGE и вестерн-блоттинга подтвердили наличие экспрессируемых белков на ожидаемых молекулярных массах, а количественный ELISA показал значимые уровни продукции цитокинов — 420±35 нг/мл для IL-10 и 510±40 нг/мл для IL-22, причём концентрация IL-22 была приблизительно на 21 % выше, чем IL-10. Эти данные согласуются с визуальной интенсивностью полос в электрофоретических и иммуноблоттинговых экспериментах, что указывает на воспроизводимость и надёжность системы.

Разработанная конструкция обеспечивает не только стабильную коэкспрессию двух ключевых

цитокинов, но и сохранение их функциональной активности, что открывает перспективы для создания новых биопрепаратов с иммуномодулирующим действием в ветеринарной практике. В то же время дальнейшие исследования должны быть направлены на *in vivo* оценку эффективности и безопасности таких пробиотических систем, изучение их влияния на микробиоту и определение оптимальных условий применения в хозяйственных условиях.

Литература

1. Concentration methods for the quantification of coronavirus and other potentially pandemic enveloped virus from wastewater / M. Rusiñol, S. Martínez-Puchol, E. Forés, et al. // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020. Vol. 17. P. 21-28. doi: 10.1016/j.coesh.2020.08.002
2. Colonizing Microbes, IL-10 and IL-22: Keeping the Peace at the Mucosal Surface / E. Kidess, M. Kleerebezem, S. Brugman // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. P. 729053. doi: 10.3389/fmicb.2021.729053
3. Bifidobacterium alters the gut microbiota and modulates the functional metabolism of T regulatory cells in the context of immune checkpoint blockade / S. Sun, L. Luo, W. Liang, et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 44. P. 27509-27515. doi: 10.1073/pnas.1921223117
4. Evaluating the Efficacy of Probiotics on Inflammatory Cytokines in Alcoholic Liver Disease: A Focus on IL-6 and IL-10 / J. Bahetiyaer, J. Cui, W. Li, et al. // *Nutrients*. 2026. Vol. 18. No. 4. P. 666. doi: 10.3390/nu18040666
5. IL-10 and IL-22 in Mucosal Immunity: Driving Protection and Pathology / H. X. Wei, B. Wang, B. Li // *Frontiers in Immunology*. 2020. Vol. 11. P. 1315. doi: 10.3389/fimmu.2020.01315
6. Challenges and Pitfalls in the Engineering of Human Interleukin 22 (hIL-22) Secreting *Lactobacillus reuteri* / L. Ortiz-Velez, A. Goodwin, L. Schaefer, et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 543. doi: 10.3389/fbioe.2020.00543
7. Dynamics of IL-1P and IL-10 Content in Blood Plasma in Experimental Animals During Modeling of a Wound Process Under Low Altitude Conditions and in the Period of Deadaptation to High Altitude / B. Niyazov, Zh. Mamakeev, A. Sabitov, et al. // *Bulletin of Science and Practice*. 2020. Vol. 6. No. 11. P. 226-234.
8. IL-12 DNA Displays Efficient Adjuvant Effects Improving Immunogenicity of Ag85A in DNA Prime/MVA Boost Immunizations / M. P. Morelli, M. P. Del Medico Zajac, J. M. Pellegrini, et al. // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2020. Vol. 10. P. 581812. doi: 10.3389/fcimb.2020.581812
9. Identification, functional characterization and immune response profiles of interleukin-10 in *Nibeal biflora* / Y. Liu, M. Wenren, W. Cheng, et al. // *Fish & Shellfish Immunology*. 2024. Vol. 151. P. 109654. doi: 10.1016/j.fsi.2024.109654
10. SUMOylation modulates the stability and function of PI3K-p110 β / A. El Motiam, C. F. de la Cruz-Herrera, S. Vidal, et al. // *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2021. Vol. 78. No. 8. P. 4053–4065. doi: 10.1007/s00018-021-03826-6.
11. Identification, Expression and Antimicrobial Functional Analysis of Interleukin-8 (IL-8) in Response to *Streptococcus iniae* and *Flavobacterium caviae* in Asian Seabass (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) / C. Muangrerk, A. Uchuwittayakul, P. Srisapoom // *Animals*. 2024. Vol. 14. No. 3. P. 475. doi: 10.3390/ani14030475
12. Second-generation Probiotics Producing IL-22 Increase Survival of Mice After Total Body Irradiation / X. Zhang, R. Fisher, W. Hou, et al. // *In Vivo*. 2020. Vol. 34. No. 1. P. 39-50. doi: 10.21873/invivo.11743
13. Tahvildari M., Dana R. Low-Dose IL-2 Therapy in Transplantation, Autoimmunity, and Inflammatory Diseases // *Journal of Immunology*. 2019. Vol. 203. No. 11. P. 2749-2755.
14. Multifaceted Roles of IL-26 in Physiological and Pathological Conditions / B. Georgieva, D. Karanović, I. Veličković, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 27. No. 1. P. 325. doi: 10.3390/ijms27010325
15. De novo interleukin-10 production primed by *Lactobacillus sakei* CVL-001 amplifies the immunomodulatory abilities of mesenchymal stem cells to alleviate colitis / P. T. Nguyen, Y. Seo, J.-S. Ahn, et al. // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2025. Vol. 182. P. 117745. doi: 10.1016/j.biopha.2024.117745
16. Generation of recombinant vaccinia virus and analysis of virus-induced cell death / Z. Liu, K. Kang, F. K. M. Chan // *STAR Protocols*. 2021. Vol. 2. No. 4. P. 100871. doi: 10.1016/j.xpro.2021.100871
17. Controlling gene expression timing through gene regulatory architecture / M. Z. Ali, R. C. Brewster, et al. // *bioRxiv*. 2021. 2021.04.09. P. 439163. doi: 10.1101/2021.04.09.439163
18. Single-cell measurement of plasmid copy number and promoter activity / B. Shao, S. Rammohan, J. R. Anderson, et al. // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. P. 1475. doi: 10.1038/s41467-021-21734-y
19. Characterization of *Lactobacillus* spp. isolated from layer hens as probiotic candidates / J. Zhang, A. R. McWhorter, S. Khan, et al. // *BMC Veterinary Research*. 2025. Vol. 21. Art. 416. doi: 10.1186/s12917-025-04847-0
20. Poxvirus-encoded decapping enzymes promote selective translation of viral mRNAs / F. Cantu, S. Cao, C. Hernandez, et al. // *PLOS Pathogens*. 2020. Vol. 16. No. 10. P. e1008926. doi: 10.1371/journal.ppat.1008926

References

1. Concentration methods for the quantification of coronavirus and other potentially pandemic enveloped virus from wastewater / M. Rusiñol, S. Martínez-Puchol, E. Forés, et al. // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020. Vol. 17. P. 21-28. doi: 10.1016/j.coesh.2020.08.002
2. Colonizing Microbes, IL-10 and IL-22: Keeping the Peace at the Mucosal Surface / E. Kidess, M.

Kleerebezem, S. Brugman // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. P. 729053. doi: 10.3389/fmicb.2021.729053

3. Bifidobacterium alters the gut microbiota and modulates the functional metabolism of T regulatory cells in the context of immune checkpoint blockade / S. Sun, L. Luo, W. Liang, et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. No. 44. P. 27509-27515. doi: 10.1073/pnas.1921223117

4. Evaluating the Efficacy of Probiotics on Inflammatory Cytokines in Alcoholic Liver Disease: A Focus on IL-6 and IL-10 / J. Bahetiyaer, J. Cui, W. Li, et al. // *Nutrients*. 2026. Vol. 18. No. 4. P. 666. doi: 10.3390/nu18040666

5. IL-10 and IL-22 in Mucosal Immunity: Driving Protection and Pathology / H. X. Wei, B. Wang, B. Li // *Frontiers in Immunology*. 2020. Vol. 11. P. 1315. doi: 10.3389/fimmu.2020.01315

6. Challenges and Pitfalls in the Engineering of Human Interleukin 22 (hIL-22) Secreting *Lactobacillus reuteri* / L. Ortiz-Velez, A. Goodwin, L. Schaefer, et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 543. doi: 10.3389/fbioe.2020.00543

7. Dynamics of IL-1P and IL-10 Content in Blood Plasma in Experimental Animals During Modeling of a Wound Process Under Low Altitude Conditions and in the Period of Deadaptation to High Altitude / B. Niyazov, Zh. Mamakeev, A. Sabitov, et al. // *Bulletin of Science and Practice*. 2020. Vol. 6. No. 11. P. 226-234.

8. IL-12 DNA Displays Efficient Adjuvant Effects Improving Immunogenicity of Ag85A in DNA Prime/MVA Boost Immunizations / M. P. Morelli, M. P. Del Medico Zajac, J. M. Pellegrini, et al. // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2020. Vol. 10. P. 581812. doi: 10.3389/fcimb.2020.581812

9. Identification, functional characterization and immune response profiles of interleukin-10 in *Nibea albiflora* / Y. Liu, M. Wenren, W. Cheng, et al. // *Fish & Shellfish Immunology*. 2024. Vol. 151. P. 109654. doi: 10.1016/j.fsi.2024.109654

10. SUMOylation modulates the stability and function of PI3K-p110 β / A. El Motiam, C. F. de la Cruz-Herrera, S. Vidal, et al. // *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2021. Vol. 78. No. 8. P. 4053-4065. doi: 10.1007/s00018-021-03826-6

11. Identification, Expression and Antimicrobial Functional Analysis of Interleukin-8 (IL-8) in Response to

Streptococcus iniae and *Flavobacterium covaie* in Asian Seabass (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) / C. Muangrerk, A. Uchuwittayakul, P. Srisapoom // *Animals*. 2024. Vol. 14. No. 3. P. 475. doi: 10.3390/ani14030475

12. Second-generation Probiotics Producing IL-22 Increase Survival of Mice After Total Body Irradiation / X. Zhang, R. Fisher, W. Hou, et al. // *In Vivo*. 2020. Vol. 34. No. 1. P. 39-50. doi: 10.21873/invivo.11743

13. Tahvildari M., Dana R. Low-Dose IL-2 Therapy in Transplantation, Autoimmunity, and Inflammatory Diseases // *Journal of Immunology*. 2019. Vol. 203. No. 11. P. 2749-2755.

14. Multifaceted Roles of IL-26 in Physiological and Pathological Conditions / B. Georgieva, D. Karanović, I. Veličković, et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 27. No. 1. P. 325. doi: 10.3390/ijms27010325

15. De novo interleukin-10 production primed by *Lactobacillus sakei* CVL-001 amplifies the immunomodulatory abilities of mesenchymal stem cells to alleviate colitis / P. T. Nguyen, Y. Seo, J.-S. Ahn, et al. // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2025. Vol. 182. P. 117745. doi: 10.1016/j.biopha.2024.117745

16. Generation of recombinant vaccinia virus and analysis of virus-induced cell death / Z. Liu, K. Kang, F. K. M. Chan // *STAR Protocols*. 2021. Vol. 2. No. 4. P. 100871. doi: 10.1016/j.xpro.2021.100871

17. Controlling gene expression timing through gene regulatory architecture / M. Z. Ali, R. C. Brewster, et al. // *bioRxiv*. 2021. 2021.04.09.439163. doi: 10.1101/2021.04.09.439163

18. Single-cell measurement of plasmid copy number and promoter activity / B. Shao, S. Rammohan, J. R. Anderson, et al. // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. P. 1475. doi: 10.1038/s41467-021-21734-y

19. Characterization of *Lactobacillus* spp. isolated from layer hens as probiotic candidates / J. Zhang, A. R. McWhorter, S. Khan, et al. // *BMC Veterinary Research*. 2025. Vol. 21. Art. 416. doi: 10.1186/s12917-025-04847-0

20. Poxvirus-encoded decapping enzymes promote selective translation of viral mRNAs / F. Cantu, S. Cao, C. Hernandez, et al. // *PLOS Pathogens*. 2020. Vol. 16. No. 10. P. e1008926. doi: 10.1371/journal.ppat.1008926

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства (сельскохозяйственные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-113-119

УДК 636.4.084.522.056:[579.64:663.12]

Использование монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* в кормлении помесных боровков

О. А. Артемьева^{1✉}, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией «Микробиология»

Р. В. Некрасов^{1,2}, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, директор ВНИИФБиП

А. Ю. Солина¹, аспирант лаборатории «Микробиология»

¹ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

142132, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, 60

²Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»

249013, Калужская область, г. Боровск, пос. Институт

✉ vijmikrob@mail.ru.

Резюме. Для оптимизации микробиоты пищеварительного тракта используют пробиотические препараты, включая живые дрожжи, которые положительно влияют на физиологические, биохимические и иммунные процессы. Изучение эффективности использования монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* при включении в рацион свиней в период доращивания проводилось в течение 30 дней. Объектами исследования были 24 помесных боровка (F-2: (КБхЛ)хД), разделённые на 2 группы со средней живой массой 18,77 кг по принципу пар-аналогов. Животным опытной группы дополнительно к основному рациону скармливали 2 мл живых дрожжей (10^6 КОЕ/мл) на 1 кг корма, что повлекло увеличение прироста живой массы боровков опытной группы на 2,3 % ($p>0,05$) по сравнению с контролем. Для балансового опыта в конце основного периода из опытной и контрольной групп было отобрано по 3 животных, которых на 5 суток перевели в индивидуальные клетки. Скармливание живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* привело к лучшей переваримости сырой клетчатки корма животными опытной группы на 19,5 % выше контроля ($p<0,05$). При равном показателе потребления азота (57,65 г/сут.) использование принятого и переваренного азота у животных опытной группы было выше на 4,5 % и 5,6 % животных контроля ($p>0,05$). Ретенция кальция и фосфора на 9,4 % и 9,2 % ($p>0,05$) соответственно выше также у животных опытной группы. С учетом более эффективного использования комбикорма и обменной энергии у животных опытной группы затраты кормов на единицу прироста живой массы снижались на 2,9 %. Полученные результаты доказывают целесообразность использования монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* при включении в рацион свиней в период доращивания.

Ключевые слова: живые дрожжи, *Rhodotorula mucilaginosa*, микробный кормовой продукт, свиньи в период доращивания, пробиотики.

Для цитирования: Артемьева О. А., Некрасов Р. В., Солина А. Ю. Использование монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* в кормлении помесных боровков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 113-119. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-113-119

Usage of a monoculture of live yeast *Rhodotorula mucilaginosa* in feeding of crossbred young hogs

O. A. Artemyeva^{1✉}, **R. V. Nekrasov**^{1,2}, **A. Yu. Solina**¹

¹FSBEI Research Center for Animal Husbandry named after L.K. Ernst

142132, Moscow Region, Podolsk town, Dubrovitsy Settlement, 60

²All-Russian Research Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition - Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center for Animal Husbandry - Research Center for Animal Husbandry named after L.K. Ernst

249013, Kaluga Region, Borovsk city, Institute settlement

✉ vijmikrob@mail.ru.

Abstract. Probiotic preparations, including live yeast, are used to improve the gastrointestinal microbiota. They have a positive effect on physiological, biochemical and immune processes. A study of the effectiveness of a live yeast monoculture, *Rhodotorula mucilaginosa*, when included in the diet of rearing pigs was conducted over a 30-day period. The study objects were 24 crossbred young hogs (F-2: (KBxL)xD), divided into two groups with an average live weight of 18.77 kg,

using the matched-pair principle. The experimental group animals were fed with 2 ml of live yeast (10^6 CFU/ml) per 1 kg of feed in addition to the main diet, which resulted in a 2.3% ($p > 0.05$) increase in live weight gain of the experimental boars compared to the control group. For the balance experiment, 3 animals were selected from each experimental and control group at the end of the main period and transferred to individual cages for 5 days. Feeding with live yeast *Rhodotorula mucilaginosa* resulted in better digestibility of crude fiber in the experimental group animals by 19.5% higher than in the control group ($p < 0.05$). With equal nitrogen consumption (57.65 g/day), the utilization of ingested and digested nitrogen in the experimental group animals was 4.5% higher than in the control group animals and 5.6% higher ($p > 0.05$). Calcium and phosphorus retention were also higher by 9.4% and 9.2% ($p > 0.05$), respectively, among animals from the experimental group. Given the more efficient usage of feed and metabolic energy of animals from the experimental group, feed costs per unit of live weight gain decreased by 2.9%. The obtained results demonstrate the feasibility of using a live yeast monoculture of *Rhodotorula mucilaginosa* in the diet of rearing period pigs.

Keywords: live yeast, *Rhodotorula mucilaginosa*, microbial feed product, rearing period pigs, probiotics.

For citation: Artemyeva O. A., Nekrasov R. V., Solina A. Yu. Usage of a monoculture of live yeast *Rhodotorula mucilaginosa* in feeding of crossbred young hogs // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 113-119 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-113-119

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 23-16-00167

Введение

На сегодняшний день в отрасли сельскохозяйственного производства активно ведутся работы по минимизации последствий широкого распространения антибиотиков. Наиболее перспективным направлением представляется сбалансированное использование пробиотических агентов для снижения негативных эффектов антибиотиков. Хотя антибиотики обладают стимулирующим воздействием на рост сельскохозяйственных животных, их широкое применение создает значительную угрозу как для животноводства, так и для здоровья конечного потребителя и окружающей среды в целом. Многочисленные исследования показали, что повсеместное использование антибиотиков широкого спектра действия способствует развитию мультирезистентности бактериальной флоры. При этом разработка и внедрение новых антибиотиков ведет к возникновению новых уровней устойчивости бактерий [1].

В контексте биобезопасности применение пробиотических культур, стимулирующих рост животных и являющихся альтернативой антибиотикам, набирает всё большую популярность благодаря положительному влиянию непосредственно на здоровье сельскохозяйственных животных, опосредованно – на конечных потребителей и окружающую среду [2, 3, 4].

За последние два десятилетия использование пробиотиков для поддержания здоровья человека и животных значительно возросло. Под пробиотиками понимают живые микроорганизмы, которые при введении в рекомендованных дозах приносят пользу здоровью хозяина [5].

Для оптимизации микробиоты пищеварительного тракта используют пробиотические препараты, включая живые дрожжи, которые положительно влияют на физиологические, биохимические и иммунные процессы. В сельском хозяйстве добавление живых дрожжей в корма повышает энергоотдачу и эффективность использования корма.

Исследования показывают, что включение в рацион дрожжевых культур *S. cerevisiae* улучшает рост

и усвояемость питательных веществ корма поросятами-отъемышами [6], способствует росту, лучшей конверсии кормов и состоянию микробиома у свиней [7].

Hu Ping, Mao Junxia и др. проводили исследование влияния *Rhodotorula mucilaginosa*, выделенной из почвы, на рост и развитие поросят-отъемышей. Поросята, которым помимо основного рациона вводили 1 мл раствора с концентрацией $1,0 \times 10^{10}$ КОЕ/мл *R. mucilaginosa* три раза в день, показали лучшие приросты массы тела и увеличение среднесуточного потребления корма ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой, получавшей только основной рацион. Также у опытной группы было отмечено снижение частоты диарей ($p < 0,05$) и увеличение высоты ворсинок в подвздошной кишке ($P < 0,05$), что положительно влияет на всасывание питательных веществ тонким кишечником. Кроме того, зафиксирована стабилизация микробиологического баланса кишечного тракта у поросят опытной группы [8].

Проведенное нами исследование нацелено на уточнение пробиотической активности дрожжевой культуры *Rhodotorula mucilaginosa* и влияния на организм свиней в период дорастивания.

Цель исследований – изучение эффективности использования монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* при включении в рацион свиней в период дорастивания.

Материалы и методы

Работы с биологическим материалом проводили в помещении, соответствующем СанПиН 3.3686-21. Исследования осуществляли *in vitro* в лаборатории микробиологии и лаборатории химико-аналитических исследований в животноводстве, *in vivo* научно-хозяйственный и балансовый опыт на физиологическом дворе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста с 31 мая по 30 июня 2022 г.

Предварительно было проведено культивирование монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* на плотных питательных средах при 30°C в течение 48 ч на среде ДАП (глюкоза 20 г, дрожжевой экстракт 2 г, пептон 2 г, агар 30 г,

дистиллированная вода 1 л). Приготовление биопрепарата монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* применялось как стабилизированный препарат с коротким сроком хранения – 4 суток. Иммунизацию осуществляли в жидкую среду ДАП.

Объектами исследования были 24 помесных боровка (F-2: (Крупная белая х Ландрас) х Дюрок), разделённые на 2 группы по 12 голов со средней живой массой 18,76...18,78 кг, сформированные по принципу пар-аналогов.

Был разработан общий план опыта по кормлению животных (табл. 1).

Таблица 1. Схема проведения эксперимента

Группа	Голов в группе	Характеристика кормления
Научно-хозяйственный опыт на поросятах – 30 дней		
контрольная	12	Комбикорм стандартный СК-4 (ОР)
опытная	12	ОР с дополнительным включением 2 мл живых дрожжей (10^6 КОЕ/мл) на 1 кг рациона
в том числе, балансовый опыт – 5 дней		
контрольная	3	ОР
опытная	3	ОР с дополнительным включением 2 мл живых дрожжей (10^6 КОЕ/мл) на 1 кг рациона

Комбикорм стандартный СК-4 – основной рацион (ОР) соответствовал по показателям энергетической и питательной ценности требованиям для данного возрастного и весового уровня животных [9]. Состав корма: пшеница – 38,8 %, ячмень – 31,1 %, соевый шрот – 16,9 %, подсолнечный шрот – 4,8 %, рыбная мука – 3,0 %, белковая кормосмесь – 2,4 %, сульфат лизина – 0,47 %, метионин – 0,06 %, треонин – 0,03 %, поваренная соль – 0,37 %, монокальцийфосфат – 0,6 %, известняковая мука – 1,3 %, премикс – 0,3 %.

Животным опытной группы в утреннее кормление задавали 2 мл живых дрожжей (10^6 КОЕ/мл) на 1 кг корма.

Условия кормления, содержания, температура, влажность, свет и газовый состав воздуха во всех группах соответствовали зоогигиеническим нормам и были одинаковыми. Взвешивание животных проводили в начале опыта и каждые 10 дней. На основе этих данных рассчитывали валовой и среднесуточный приросты, а также затраты кормов на единицу прироста. В конце периода дорастивания проведен балансовый опыт по изучению переваримости питательных веществ комбикорма, использования животными азота, кальция и фосфора по общепринятой методике.

Для определения влияния испытываемых добавок на поедаемость кормов проводился ежедневный индивидуальный учет задаваемых кормов и их остатков на протяжении всего учетного периода. После окончания опыта средние пробы кормов, кала и мочи были подвергнуты химическому анализу в

лаборатории химико-аналитических исследований ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста по общепринятым методикам.

Высушиванием образцов при температуре 60...70 °С до постоянной массы определяли первоначальную влагу, высушиванием при температуре 100...105 °С – гигроскопическую.

В пробах образцов в воздушно-сухом состоянии определяли содержание:

- сырой золы – сжиганием навески в муфельной печи при температуре 600...700 °С;
- общего азота – методом Кьельдаля; содержание сырого протеина – путем умножения процентного содержания азота на коэффициент 6,25;
- сырого жира – экстрагированием серным эфиром в аппарате Сокслета по методу С.В. Рушковского;
- сырой клетчатки – кипячением в слабых растворах кислот и щелочей по методу Геннеберга и Штомана;
- суммы липидов – экстракцией раствора, хлороформ-метанол по Фолчу;
- безазотистых экстрактивных веществ – расчетным путем, по разности между количеством органического вещества и содержанием в нем сырых протеина, жира, клетчатки, золы и гигровлаги;
- кальция – комплексным методом, кипячением в растворе соляной кислоты и дальнейшим титрованием раствора трилоном Б;
- фосфора – колориметрическим методом (по Фиске-Суббороу).

На основании данных физиологического этапа опыта была рассчитана Обменная энергия (ОЭ) по переваримым питательным веществам по формуле:

$$\text{ОЭ}_{\text{св.}} = 20,85 \cdot \text{пП} + 36,63 \cdot \text{пЖ} + 14,27 \cdot \text{пК} + 16,95 \cdot \text{пБЭВ},$$

где ОЭ – обменная энергия в 1 кг корма, МДж; пП – переваримый протеин, кг; пЖ – переваримый жир, кг; пК – переваримая клетчатка, кг; пБЭВ – переваримые экстрактивные вещества, кг (*Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справочное пособие / под ред.: А.П. Калашникова, В.И. Фисина, В.В. Щеглов и др. М., 2003. 456 с.*).

Статистический анализ выполнен методом дисперсионного анализа (ANOVA) с помощью программы STATISTICA, версия 13 (StatSoft, 2011). Результаты исследований считали высокодостоверными при $***p < 0,001$ и достоверными при $**p < 0,01$ и $*p < 0,05$. При $p < 0,1$, но $p > 0,05$ – тенденция к достоверности полученных данных. При $p > 0,1$ разницу считали недостоверной.

Результаты

Период дорастивания – это промежуточная фаза в технологии свиноводства, следующая после отъема поросят и предшествующая интенсивному откорму. Целью данного периода является подготовка молодняка к быстрому набору массы тела животных на этапе откорма [9]. Наблюдение за динамикой живой массы поросят в период опыта показало, что включение в рацион микробиологической добавки

позволило за период доращивания получить прирост живой массы в опытной группе на 2,3 % выше ($p > 0,05$) по сравнению с контролем (табл. 2).

Таблица 2. Динамика роста подопытных боровков ($M \pm m$)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Количество голов	12	12
Живая масса в начале опыта, кг	18,76±0,32	18,78±0,20
Живая масса в конце периода, кг	39,89±0,67	40,53±0,28
Валовой прирост живой массы, кг	21,13±0,55	21,76±0,35
Среднесуточный прирост, г	704,44±18,34	725,28±11,71

Для проведения балансового опыта в конце опытного периода из каждой группы — контрольной и опытной — были отобраны по 3 животных. Поросята были перемещены в специализированные клетки с индивидуальным кормлением и средствами для сбора естественных продуктов обмена веществ. Длительность физиологических исследований составила 5 учетных дней.

Включение живых дрожжей в рацион для кормления молодняка свиней приводило к тенденции повышения переваримости сухого и органического вещества, безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) при равной переваримости сырого протеина и жира. При этом было отмечено повышение переваримости сырой клетчатки корма на 19,5 % ($p < 0,05$) животными опытной группы относительно контроля (табл. 3).

Таблица 3. Переваримость питательных веществ, % ($M \pm m$, $n=3$)

Питательное вещество	Группа	
	контрольная	опытная
Сухое вещество	81,87±0,26	82,17±1,10
Органическое вещество	83,86±0,17	84,11±0,99
Сырой протеин	82,19±1,03	82,05±1,58
Сырой жир	37,42±2,01	35,47±2,14
Сырая клетчатка	31,96±1,44	38,20±1,09*
Сырые БЭВ	89,15±0,48	89,25±0,68

*Достоверно при $p < 0,05$, по сравнению с контролем.

Потребление азота животными было одинаковым для контрольной и опытной групп и составило 57,65 г в сутки. Однако включение в рацион пробиотической дрожжевой добавки положительно повлияло на интенсивность роста у опытной группы по сравнению с контролем. При практически равной переваримости сырого протеина скармливание биопрепарата монокультуры живых дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa* растущему молодняку дрожжевой добавки в составе комбикормов приводило к тенденции улучшения использования как принятого, так и переваренного азота на 4,5 % и 5,6 %, соответственно, по сравнению с контролем.

Таблица 4. Среднесуточный баланс и использование азота корма (в среднем по группе, $M \pm m$, $n=3$)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Принято с кормом, г	57,65	57,65
Выделено в кале, г	10,27±0,60	10,35±0,91
Переварено, г	47,38±0,49	47,30±0,75
Выделено в моче, г	20,59±1,34	17,91±1,08
Удержано в теле, г	26,79±1,68	29,39±1,04
Использовано в %:		
от принятого	46,48±2,91	50,98±1,81
от переваренного	56,51±3,05	62,15±2,04

Баланс кальция и фосфора у поросят исследуемых групп был положительным. Количество кальция и фосфора, выделенных с экскрементами в контрольной и опытной группах, оказалось сопоставимым и составило 6,83; 6,19 г и 4,35; 4,13 г соответственно. Содержание кальция и фосфора, выделенных с мочой, было незначительным у обеих групп.

Удержание в организме кальция у поросят опытной группы составило 7,56 г против 6,92 г в контроле, данный показатель свидетельствует о позитивной тенденции ретенции кальция. Также и количественный показатель удержания фосфора был на 9,4 % выше у животных опытной группы, что свидетельствует об отсутствии отрицательного влияния исследованного фактора на минеральный обмен у животных.

Таблица 5. Среднесуточный баланс и использование кальция и фосфора (в среднем по группе, $M \pm m$, $n=3$)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Баланс кальция		
Принято с кормом, г	13,97	13,97
Выделено в кале, г	6,83±0,46	6,19±0,35
Выделено в моче, г	0,22±0,01	0,22±0,05
Удержано в теле, г	6,92±0,46	7,56±0,38
Использовано от принятого, %	49,57±3,27	54,12±2,73
Баланс фосфора		
Принято с кормом, г	6,82	6,82
Выделено в кале, г	4,35±0,18	4,13±0,17
Выделено в моче, г	0,24±0,01	0,25±0,04
Удержано в теле, г	2,23±0,18	2,44±0,20
Использовано от принятого, %	32,71±2,70	35,77±2,98

Важно отметить, что применение исследуемой пробиотической добавки не оказывало отрицательного влияния в целом на потребление корма — показатель потребления остался на уровне контрольной группы. При этом благодаря лучшему приросту живой массы у животных в опытной группе снижались общие затраты кормов на единицу прироста, что способствует повышению экономической эффективности кормления животных (табл. 6).

Таблица 6. Затраты кормов в опыте на молодняке свиней (в расчете на 1 голову)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Содержание ОЭ в 1 кг комбикорма, МДж*	12,58	12,6
Израсходовано кормов за период, кг	43,5	43,5
Израсходовано за сутки:		
комбикорма, кг	1,176	1,176
ОЭ, МДж*	14,79	14,81
Получено валового прироста за период, кг	21,13	21,76
Затраты комбикорма на 1 кг прироста, кг	2,06	2,00
в % к контролю	100	97,1
Затраты ОЭ на 1 кг прироста, МДж	37,09	36,07
в % к контролю	100	97,3

* - по переваримым питательным веществам

У животных, получавших пробиотическую добавку, затраты на 1 кг прироста снижались на 2,9 и 2,7 %, соответственно, в расчете на использование корма и обменной энергии относительно контрольной группы.

Обсуждение

К основным качественным показателям мясной скороспелости относится скорость роста животных. Этот показатель характерен для представителей одной породы и является наследуемым признаком, связанным с обменными процессами организма [9]. Включение пробиотической добавки *Rhodotorula mucilaginosa* на фоне сбалансированного кормления позволило улучшить прирост живой массы в опытной группе (725,3 г против 704,4 г в контроле) за счет переваримости питательных веществ, в первую очередь, сырой клетчатки. Переваримость и усвоение питательных веществ в период дорастивания крайне важна для молодняка, низкий показатель переваримости приводит к неэффективному использованию питательных веществ, снижению продуктивности и увеличению экскреции непереваренных остатков корма [10]. Повышение переваримости сырой клетчатки на 19,5 % относительно контроля могло быть обусловлено положительным воздействием на жизнедеятельность микрофлоры кишечника у животных, способствующим формированию более эффективного функционального состояния пищеварительного тракта по сравнению с контрольной группой.

Дрожжевые препараты могут улучшить показатели роста, снизить частоту диареи, улучшать состояние кишечника, а также увеличить разнообразие и численность микрофлоры в толстом кишечнике поросят-отъемышей. В исследовании [11] пероральный прием дрожжей увеличил среднесуточный прирост, высоту ворсинок подвздошной кишки, соотношение высоты ворсинок и глубины крипт, снизил частоту диареи и смертность, концентрацию азота мочевины

крови и малонового диальдегида, улучшил разнообразие микрофлоры в слепой кишке.

Ожидается, что дрожжи будут использоваться в качестве альтернативных антибиотикам кормовых добавок при выращивании поросят-отъемышей.

В период дорастивания свиней белковый обмен имеет первостепенное значение, поскольку азот является основой для построения белков, которые необходимы для быстрого роста и развития животного. Достаточное потребление белка и, следовательно, азота обеспечивает формирование мышечной ткани, ферментов и других жизненно важных структур, что напрямую влияет на среднесуточные приросты молодняка животных [9]. Повышение использования как принятого, так и переваренного азота животными на 4,5 % и 5,6 % соответственно имеет крайне важное значение для улучшения эффективности кормления, снижения затрат, минимизации негативного воздействия на окружающую среду и оптимизации роста и развития поросят [12, 13].

Баланс минеральных веществ (в первую очередь, кальция и фосфора) в рационе свиней периода дорастивания критически важен для формирования прочного скелета, нормального роста и обмена веществ. Отклонения в соотношении могут привести к рахиту, нарушениям в развитии костей, снижению прироста массы и ухудшению общего состояния здоровья животных, влияя на их продуктивность в будущем [14]. При включении дрожжевой подкормки наблюдалась тенденция к улучшению удержания кальция и фосфора в организме животных посредством снижения выделения микроэлементов с экскрементами.

В исследовании [8] пероральный приём *R. mucilaginosa* TZR2014 улучшил показатели роста, повысил антиоксидантную способность, укрепил желудочно-кишечный тракт и поддержал микробиологический баланс кишечника у поросят, что в целом соотносится с полученными в нашем исследовании данными.

Эксперименты показали, что каротиноиды могут повышать устойчивость к болезням, антиоксидантную способность и темпы роста, не вызывая при этом цитотоксичности или других побочных эффектов [15]. Добавление *R. mucilaginosa* в рацион может восполнить недостаток пищеварительных ферментов и восстановить морфологию кишечника, нарушенную в результате стресса при отъеме, а также улучшить усвоение корма и показатели роста [16].

Важно отметить, что применение дрожжевых добавок не оказывает отрицательного влияния на потребление корма [17, 18, 19]. В наших исследованиях показатели потребления остались на уровне контрольной группы. При этом благодаря улучшению скорости прироста у животных в опытной группе снижаются общие затраты кормов, что способствует повышению экономической эффективности предприятия. Исходя из описанного выше, можно сделать

вывод, что использование дрожжевой пробиотической добавки является перспективным способом повышения продуктивности свиней без увеличения кормовых затрат, что особенно актуально для хозяйств промышленного типа, стремящихся к оптимизации расходов и увеличению выхода живой массы животных.

Заключение

Включение дрожжевой пробиотической добавки *Rhodotorula mucilaginosa* в рацион свиней в период доращивания положительно влияет на продуктивность и обмен веществ животных. Применение добавки обеспечило увеличение среднесуточного прироста живой массы на 2,3 % относительно контроля при сохранении уровня потребления корма.

Использование принятого и переваренного азота животными (4,5 %, 5,6 % относительно контроля) указывает на улучшение эффективности белкового обмена и способствует росту мышечной ткани, а переваримость сырой клетчатки повысилась (38,20 % против 31,96 % в контроле), что связано с улучшением микрофлоры кишечника и функционального состояния пищеварительного тракта. Баланс кальция и фосфора остался стабильным, что гарантирует нормальное формирование скелета и здоровье животных.

Включение дрожжевой пробиотической добавки *Rhodotorula mucilaginosa* в рацион свиней в период доращивания является многообещающей стратегией для улучшения продуктивных и физиологических показателей свиноводства. Дрожжевая пробиотическая добавка способствует оптимизации обменных процессов, повышению качества и скорости прироста живой массы, улучшению усвоения питательных веществ молодняка без увеличения кормовых затрат. Эти результаты подкрепляют возможность широкого применения дрожжевых пробиотиков в современных технологиях свиноводства, направленных на повышение устойчивости и эффективности производства.

Литература

1. Schjørring S., Krogfelt K.A. Assessment of Bacterial Antibiotic Resistance Transfer in the Gut // *International Journal of Microbiology*. 2011. Vol.11. No.10. P. 115-124. doi:10.1155/2011/312956
2. Эффективность использования пробиотиков Бацелл и Моноспорин в рационах коров и телят / Л. Г. Горковенко, А. Е. Чиков, Н. А. Омельченко и др. // *Зоотехния*. 2011. № 3. С. 13-14.
3. Демин Н. Я. Современное свиноводство России: проблемы и перспективы // *Вестник Орловского ГАУ*. 2011. №6 (33). С. 13-14.
4. Evaluation of digestarom and thyme as phyto-genic feed additives for broiler chickens / K. M. Sadek, H. A. Ahmed, M. Ayoub, et al. // *European Poultry Science*. 2014. Vol. 78. P. 1612-1619. doi:10.1399/eps.2014.55

5. Reid G. Probiotics: Definition, scope and mechanisms of action // *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*. 2016. Vol. 30. P. 17-25. doi:10.1016/j.bpg.2015.12.001

6. Liu X., Li T., Ho K.I. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, fecal score, and nutrient digestibility of weaning pigs // *Korean Journal of Agricultural Science*. 2018. Vol. 45. P. 677-685. doi:10.7744/kjoas.20180016

7. Dietary xylanase and live yeast supplementation influence intestinal bacterial populations and growth performance of piglets fed a sorghum-based diet / G. González-Ortiz, M.A. Callegari, P. Wilcock, et al. // *Animal Nutrition*. 2020. Vol. 6. P. 457-466. doi:10.1016/j.aninu.2020.05.005

8. Isolation, Identification, and Function of *Rhodotorula mucilaginosa* TZR2014 and Its Effects on the Growth and Health of Weaned Piglets / P. Hu, J. Mao, Y. Zeng, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 111-121. doi:10.3389/fmicb.2022.922136

9. Разведение сельскохозяйственных животных / А. Х. Хайитов, С. А. Брагинцев, У. Ш. Джуроева и др.; под редакцией А. Х. Хайитов. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 248 с.

10. Гамко Л. Н., Кубышкин А. В., Хомченко В. В. Использование обменной энергии и протеина молодняком свиней при скормливании комбикормов с минеральной добавкой // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 4. С. 165-170.

11. Effects of Dietary Yucca Schidigera Extract and Oral Candida utilis on Growth Performance and Intestinal Health of Weaned Piglets / Z. Yang, Y. Wang, T. He, et al. Tang // *Front Nutr*. 2021. Vol. 26. No. 8. P.685540. doi:10.3389/fnut.2021.685540.

12. Бирта, Г. Белковый состав крови свиней при разной интенсивности выращивания // *Свиноферма*. 2006. № 12. С. 10–11.

13. Гематологические показатели свиней разных генотипов / Е. В. Пронь, В. И. Герасимов, Т. Н. Данилова // *Сборник научных трудов XIV международной научно-практической конференции по свиноводству. Современные проблемы интенсификации производства свинины*. Ульяновск: УГСХА. 2007. Том 1. С. 325-330.

14. Фармакокоррекция гипотрофии и рахита молодняка свиней: монография / А. В. Савинков, М. П. Семененко, О. С. Гусева, и др. Самара: СамГАУ, 2020. 222 с.

15. Nakano T., Wiegertjes G. Properties of carotenoids in fish fitness: a review // *Mar. Drugs*. 2020. Vol.18. P. 568. doi:10.3390/md18110568

16. The small intestine microbiota, nutritional modulation and relevance for health. / S. El Aidy, B. Van Den Bogert, M. Kleerebezem, et al. // *Curr. Opin. Biotechnol*. 2015. Vol. 32. P. 14-20. doi:10.1016/j.copbio.2014.09.005

17. Естественная резистентность свиней в условиях промышленной технологии выращивания / Г. В.

Максимов, О. Н. Полозюк, Е. И. Федюк, и др. // Ветеринария. 2010. № 9. С. 43-47.

18. Dietary xylanase and live yeast supplementation influence intestinal bacterial populations and growth performance of piglets fed a sorghum-based diet / G. González-Ortiz, M.A. Callegari, P. Wilcock, et al. // Animal Nutrition. 2020. Vol. 6. P. 457-466.

19. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, fecal score, and nutrient digestibility of weaning pigs. / X. Liu, T. Li, K.I. Ho, Et al. // Korean Journal of Agricultural Science. 2018. Vol. 45. P. 677-685.

References

1. Schjørring S., Krogfelt K.A. Assessment of Bacterial Antibiotic Resistance Transfer in the Gut // International Journal of Microbiology. 2011. Vol. 11. No. 10. P. 115-124. doi:10.1155/2011/312956

2. Efficiency of using Bacell and Monosporin probiotics in cow and calf diets / L. G. Gorkovenko, A. E. Chikov, N. A. Omelchenko, et al. // Zootechnics. 2011. No. 3. P. 13-14.

3. Demin N. Ya. Modern pig breeding in Russia: problems and prospects // Vestnik of Oryol State Agrarian University. 2011. No. 6 (33). P. 13-14.

4. Evaluation of digestarom and thyme as phyto-genic feed additives for broiler chickens / K. M. Sadek, H. A. Ahmed, M. Ayoub, et al. // European Poultry Science. 2014. Vol. 78. P. 1612-1619. doi:10.1399/eps.2014.55

5. Reid G. Probiotics: Definition, scope and mechanisms of action // Best Practice & Research Clinical Gastroenterology. 2016. Vol. 30. P. 17-25. doi:10.1016/j.bpg.2015.12.001

6. Liu X., Li T., Ho K.I. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, fecal score and nutrient digestibility of weaning pigs // Korean Journal of Agricultural Science. 2018. Vol. 45. P. 677-685. doi:10.7744/kjoas.20180016

7. Dietary xylanase and live yeast supplementation influence intestinal bacterial populations and growth performance of piglets fed a sorghum-based diet / G. González-Ortiz, M.A. Callegari, P. Wilcock, et al. // Animal Nutrition. 2020. Vol. 6. P. 457-466. doi:10.1016/j.aninu.2020.05.005

8. Isolation, Identification and Function of *Rhodotorula mucilaginosa* TZR2014 and Its Effects on the Growth and Health of Weaned Piglets / P. Hu, J. Mao, Y. Zeng, et al. // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. P. 111-121. doi:10.3389/fmicb.2022.922136

9. Breeding of farm animals / A. Kh. Khaitov, S. A. Braginet, U. Sh. Dzhuraeva, et al.; edited by A. Kh. Khaitov. 2nd ed., reprinted. St. Petersburg: Lan, 2023. 248 p.

10. Gamko L. N., Kubyshev A. V., Khomchenko V. V. Utilization of metabolic energy and protein by young pigs fed with compound feed with a mineral supplement // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2019. No. 4. P. 165-170.

11. Effects of Dietary Yucca Schidigera Extract and Oral Candida utilis on Growth Performance and Intestinal Health of Weaned Piglets / Z. Yang, Y. Wang, T. He, et al. // Front Nutr. 2021. Vol. 26. No. 8. P. 685540. doi:10.3389/fnut.2021.685540.

12. Birta, G. Protein composition of pig blood at different rearing intensities // Pig farm. 2006. No. 12. P. 10-11.

13. Hematological parameters of pigs of different genotypes / E. V. Pron, V. I. Gerasimov, T. N. Danilova // Collection of scientific papers of the XIV international scientific and practical conference on pig breeding. Modern problems of pork production intensification. Ulyanovsk: USAA. 2007. Vol. 1. P. 325-330.

14. Pharmacological correction of malnutrition and rickets of young pigs: monograph / A. V. Savinkov, M. P. Semenenko, O. S. Guseva, et al. Samara: SamSAU, 2020. 222 p.

15. Nakano T., Wiegertjes G. Properties of carotenoids in fish fitness: a review // Mar. Drugs. 2020. Vol. 18. P. 568. doi: 10.3390/md18110568

16. The small intestine microbiota, Nutritional modulation and relevance for health. / S. El Aidy, B. Van Den Bogert, et al. // Curr. Opin. Biotechnol. 2015. Vol. 32. P. 14-20. doi:10.1016/j.copbio.2014.09.005

17. Natural resistance of pigs under industrial rearing technology / G. V. Maksimov, O. N. Polozuk, E. I. Feduk, et al. // Veterinary Science. 2010. No. 9. P. 43-47.

18. Dietary xylanase and live yeast supplementation influence intestinal bacterial populations and growth performance of piglets fed a sorghum-based diet / G. González-Ortiz, M.A. Callegari, P. Wilcock, et al. // Animal Nutrition. 2020. Vol. 6. P. 457-466.

19. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, fecal score and nutrient digestibility of weaning pigs. / X. Liu, T. Li, K.I. Ho // Korean Journal of Agricultural Science. 2018. Vol. 45. P. 677-685.

Оценка эффективности комбинированного консервирования *Galegi orientalis*

Е. В. Косолапова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и технологии»

ГБОУ ВО Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

606340, г. Княгинино, улица Октябрьская, 22а

✉ ngiei-126@mail.ru

Резюме. Исследования проведены для выявления оптимальной схемы применения химического и бактериального консервантов при силосовании слабо проявленной зеленой массы Галеги восточной (*Galega orientalis* L.) с содержанием сухого вещества (СВ) 240,3 г/кг. В эксперимент включены различные варианты внесения Текацида и Биотрофа 2+ как по отдельности, так и в комбинированных режимах. Материалом исследования являлся приготовленный в трехкратной повторности силос, вскрытый после 4 месяцев хранения. Объем эксперимента составил 9 вариантов силосования. Оценка эффективности комбинированного консервирования осуществляли на основании органолептической оценки и показателей pH, профилю органических кислот и уровню СВ. Лучший эффект обеспечивает последовательное внесение консервантов с Текацидом в дозах 3 и 1,5 л/т. На снижение pH значительное влияние оказало комбинированное консервирование с химическим препаратом 1,5 л/т при одновременном (pH 4,18) и последовательном (pH 4,13) внесении. Стоит отметить, что в кормах с Текацидом (5 л/т) и комбинации препаратов при их последовательном внесении с дозой Текацида 3 и 1,5 л/т масляная кислота не обнаружена. Кроме того, относительное содержание уксусной кислоты в них было менее 30 %, а содержание СВ – более 280 г/кг. Комбинированное применение консервантов на основе органических кислот и молочнокислых бактерий позволяет значительно повысить качество силоса из Галеги восточной. Установили, что наиболее эффективными являются схемы с последовательным внесением Текацида в дозе 3 и 1,5 л/т. Такой подход обеспечивает оптимальное подкисление, отсутствие маслянокислого брожения и сохранность питательных веществ.

Ключевые слова: Галега восточная; силосование; консерванты; комбинированное консервирование; качество; кислотность; сухое вещество.

Для цитирования: Косолапова Е. В. Оценка эффективности комбинированного консервирования *Galegi orientalis* // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 120-127. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-120-127

Evaluation of the efficiency of combined preservation of *Galega orientalis*

E. V. Kosolapova

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics

606340, Knyaginino, Oktyabrskaya Street, 22a

✉ ngiei-126@mail.ru

Abstract. The study was conducted to identify the appropriate application scheme for chemical and bacterial preservatives in the ensiling of slightly wilted green feed of *Galega orientalis* (L.), with a dry matter (DM) content of 240.3 g/kg. The experiment included various application variants of Tekacid and Biotrof 2+, both separately and in combination. The study material consisted of silage prepared in triplicate and unsealed after 4 months of storage. The experiment consisted of nine ensiling variants. The effectiveness of combined preservation was assessed based on organoleptic evaluation and pH values, organic acid profile and dry matter content. The best effect was achieved with sequential application of preservatives including Tekacid at doses of 3 and 1.5 l/t. Combined preservation with the chemical preparation at 1.5 l/t, applied simultaneously (pH 4.18) and sequentially (pH 4.13), significantly reduced pH. It is worth noting that butyric acid was not detected in feeds containing Tekacid (5 l/t) and the combination of preparations when applied sequentially at Tekacid doses of 3 and 1.5 l/t. Furthermore, the relative acetic acid content in them was less than 30% and the dry matter content was over 280 g/kg. The combined usage of preservatives based on organic acids and lactic acid bacteria can significantly improve the quality of silage from *Galega orientalis*. The most effective schemes were found to be those with sequential application of Tekacid at rates of 3 and 1.5 l/t. This approach ensures appropriate acidification, the absence of butyric acid fermentation and nutrient preservation.

Keywords: *Galega orientalis*, silage, preservatives, combined preservation, quality, acidity, dry matter.

For citation: Kosolapova E. V. Evaluation of the efficiency of combined preservation of *Galega orientalis* // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 120-127 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-120-127

Введение

Обеспечение стабильного качества кормов при заготовке трудно консервируемых культур остается одной из приоритетных задач в системе устойчивого

животноводства. На фоне сезонных колебаний продуктивности пастбищ и сенокосов важную роль играет заготовка биомассы, консервированной путем сенажирования, естественного силосования или обработки

консервирующими препаратами. Однако на практике получение силоса высокого качества сопряжено с рядом агротехнологических и биохимических факторов: погодные условия во время его заготовки и фаза вегетации, исходный состав фитомассы и соблюдение технологических регламентов.

Стоит отметить, что традиционные основы сырья для заготовки силоса в России составляют кукуруза, сорго, подсолнечник, а также злаковые и бобово-злаковые смеси. При этом все более широкое применение получают высокобелковые многолетние бобовые травы, в частности люцерна (*Medicago sativa* L.), клевер (*Trifolium spp.*) и особенно Галега восточная (*Galega orientalis* L.).

На ценность и эффективность этой культуры указывают многие авторы [1, 2]. Она отличается не только высоким содержанием сырого протеина (от 151 до 270 г/кг СВ) и обменной энергии (9,0...9,7 МДж/кг СВ), но и устойчивой урожайностью при минимальных энергетических затратах на возделывание [3]. Ранее установлено [4], что сбор зелёной массы Галеги восточной с 1 га на 10,0 т превосходит клевер, на 12,5 т – донник, на 16,1 т – люцерну и на 18,1 т – костреч. Анализ биохимического состава надземной массы Галеги восточной показал, что она содержит большое количество питательных и биологически активных веществ, включая аминокислоты, флавоноиды, алкалоиды, витамины С, каротин, тиопин, рибофлавин [5]. По данным ряда авторов, включая G. A. Simonov [5], в фазе бутонизации и начало цветения она отличается высокой поедаемостью и перевариваемостью. Однако из-за значительной буферной ёмкости и низкого содержания сахаров заготовить из данной культуры стабильный по качеству силос без применения консервантов практически невозможно, так как затруднен запуск и стабилизация молочнокислого брожения. Результаты современных исследований [6] показывают, что наибольшую эффективность демонстрируют препараты на органических кислотах. Сдерживающим фактором их применения является их высокая стоимость. В связи с этим возрастающий интерес вызывает использование бактериальных заквасок. Несмотря на ряд положительных моментов, связанных с безопасностью и экономичностью их использования, об их эффективности при силосовании бобовых трав существует противоречивое мнение [7, 8, 9].

Особый интерес вызывает технология комбинированного консервирования, предполагающая сочетание химического и микробиологического подходов [10]. Нами ранее была доказана высокая эффективность сочетания химического консерванта Текацид и бактериальной закваски Биосил НН при заготовке силоса из свежескошенной биомассы Галеги восточной (Патент RU 2614799) [11]. Однако вопрос о результативности такой комбинации в условиях проявления и при варьировании способов внесения компонентов остается недостаточно изученным. В связи с этим возникла необходимость в проведении комплексного исследования, направленного на оценку воздействия комбинированного

консервирования на биохимические показатели силоса, включая кислотность, содержание органических кислот и уровень СВ.

Цель исследования – установить влияние различных способов комбинированного консервирования на уровень рН, состав и соотношение органических кислот, сохранность СВ, а также качества готового силоса из слабопроявленной биомассы Галеги восточной.

Материалы и методы

Полупроизводственные исследования по консервированию слабо проявленной биомассы Галеги восточной были организованы на базе сельскохозяйственной организации ООО «Колос» (Нижегородская область, Бутурлинский район, село Кочуново).

В качестве объекта исследования использовали наземную массу первого укоса растений второго года вегетации, скошенных в фазе бутонизации-начало цветения, что соответствует оптимальному периоду для заготовки корма с максимальной кормовой ценностью. Заготовку силоса проводили курганным способом.

Агротехнические операции по заготовке осуществляли с использованием серийной сельскохозяйственной техники – кормоуборочного комбайна Дон-680М (ООО «Комбайновый завод» Ростсельмаш, Россия), автомобилей КАМАЗ-65115 (ООО «СпецАгроТрейд», Россия), гусеничного трактора Т-402-01 (ООО завод «Алтайский трактор», Россия), оснащенным навесным трамбующим оборудованием.

Период проявления характеризовался умеренными погодными условиями: переменная облачность, среднесуточная температура воздуха 16,6 °С, кратковременные осадки, скорость ветра северо-западного направления – 5,1 м/с, относительная влажность воздуха – 64 %. Указанные климатические условия обеспечили снижение влажности зеленой массы до параметров, рекомендованных для силосования бобовых культур.

В качестве консервирующих средств применяли препараты различной природы. Химический консервант «Текацид» (ООО ТекноФид, Россия) представляет многофункциональный кислотный состав, включающий: муравьиную кислоту – 52 %, формиата натрия – 7 %, пропионовую кислоту – 18 %, вода – 23 %. Биологический консервант Биотроф 2+ (ООО Биотроф, Россия) представляет собой смесь активных культур молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum* и *Enterococcus faecium* с минимальной концентрацией не менее 1×10^5 КОЕ/г силосуемой массы.

Для оценки влияния схем комбинированного консервирования была разработана экспериментальная модель, включающая 9 вариантов обработки, различающихся дозировкой и способом внесения препаратов (последовательно и в виде смешанных растворов). Каждому варианту соответствовало три повторности, в результате чего общее количество составило 27 образцов. Подробная схема опыта, а также состав и концентрация консервируемых растворов представлены на рисунке 1.

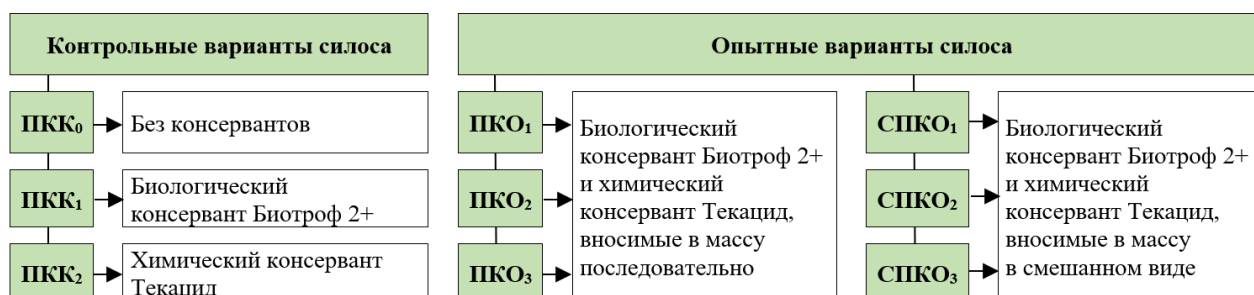


Рис. 1. Схема вариантов силоса

ПКК₀ - Без препаратов; ПКК₁ - Биотроф 2+ (1 л / 40 т); ПКК₂ - Текацид (5 л/т); ПКО₁, ПКО₂, ПКО₃, СПКО₁, СПКО₂, СПКО₃ - Биотроф 2+ (1 л / 40 т) + Текацид (5; 3; 1,5; 2; 1 и 1,5 л/т соответственно)

Фасовка опытных образцов проводилась в герметичные пакеты из барьерной плёнки (толщина 120 мкм), исключающие газообмен. Для создания условий, максимально приближенных к реальной технологии силосования, пакеты размещались внутри силосной массы кургана на высоту 1,2 м ±0,4 м от основания вдоль центральной оси. После четырёх месяцев хранения все образцы извлекли из кургана и провели лабораторные исследования.

Анализ качества полученных силосов осуществлялся в аккредитованной лаборатории Федерального центра агрохимической службы «Нижегородский» (г. Нижний Новгород). Измерение значения активной кислотности (рН) проводилось по ГОСТ 26180-84 «Корма. Методы определения аммиачного азота и активной кислотности (рН)». Количественное определение органических кислот – молочной, уксусной и масляной – осуществлялось методом капиллярного электрофореза в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56373-2015. Определение массовой доли сухого вещества проводилось по методике ГОСТ 31640-2012 «Корма. Методы определения содержания сухого вещества». Оценка санитарно-гигиенического состояния и качества готового силоса основывалась на

положениях ГОСТ Р 55986-2022 «Силос и силаж. Общие технические условия».

Каждый анализ выполняли в трехкратной повторности, что обеспечило статистическую достоверность результатов. Статистическая обработка полученных данных включала методы вариационного анализа, в том числе однофакторный дисперсионный анализ и проверку значимости различий с использованием t-критерия Стьюдента. Проверка нормальности распределения осуществлялась с использованием критерия Шапиро-Уилка. Пороговое значение уровня значимости принималось при уровне $P \leq 0,05$. Все расчёты выполнялись с применением программного обеспечения Microsoft Excel (версия 2019, Microsoft, США). Корреляционный анализ взаимосвязей между активной кислотностью (рН), составом органических кислот и содержанием СВ проводился по методике Пирсона.

Результаты

Перед заготовкой опытных образцов провели анализ для определения химического состава исходной биомассы Галеги восточной, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исходной массы козлятника, % от абс. СВ

Наименование сырья	СВ, %	Сырые питательные вещества, %				Сахар, г	Перевариваемый протеин, г/кг	ОЭ, МДж	ЭКЕ, кг
		протеин	клетчатка	жир	зола				
Среднее значение	24,0±0,07	15,7±0,11	19,1±0,12	1,9±0,03	9,0±0,05	47,0±0,09	118,0±0,09	9,8±0,04	0,98±0,01

Комплексная оценка химического состава исходной массы показала, что сырьё характеризуется умеренной степенью проявляемости и уровнем СВ, близким к нижней границе, приемлемой для силосования. Сырьё является слабо проявленным, пригодным для заготовки силоса. Среднее содержание сахаров составило 47 г/кг СВ, что по современным представлениям считается критическим минимумом для инициации молочнокислого брожения.

Органолептическая оценка образцов силоса, проводимая в соответствии с положениями ГОСТ Р 55986-2022, после четырёх месяцев хранения позволила установить, что все варианты имеют хорошее санитарно-гигиеническое состояние. Во всех образцах: отсутствовали признаки плесени, структура массы оставалась мягкой и не мажущей, цвет буровато-оливковый, запах – характерный для

качественного силоса (фруктовый и квашенных овощей). Эти данные позволяют отнести полученные образцы к доброкачественным кормам.

Одним из ключевых показателей, определяющим как технологическую эффективность процесса силосования, так и кормовую ценность продукта, является содержание СВ. Этот показатель не только служит индикатором степени обезвоживания биомассы при проявлении, но и косвенно отражает ход ферментативных процессов, протекающих в анаэробной среде в процессе силосования.

Результаты определения СВ в образцах силоса, заготовленных из слабо проявленной биомассы Галеги восточной с применением различных схем консервирования, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования содержания СВ и кислотности в опытных силосах

Код варианта	Состав растворов		Содержание СВ, г/кг	Значение pH
ПКК ₀	Без препаратов		272,0±0,22	4,47±0,04
ПКК ₁	Биотроф 2+	1 л / 30 т	291,7±0,63*	4,36±0,05
ПКК ₂	Текацид в дозе	5 л/т	301,3±0,10*	4,06±0,05*
Последовательное внесение препаратов				
ПКО ₁	Биотроф 2+* + Текацид в дозе	5 л/т	290,7±0,20*	4,03±0,01*
ПКО ₂		3 л/т	285,3±0,63*	4,02±0,03*
ПКО ₃		1,5 л/т	280,7±0,14*	4,13±0,04*
Одновременное внесение препаратов				
СПКО ₁	Биотроф 2+* + Текацид в дозе	2 л/т	285,0±0,05*	4,11±0,03*
СПКО ₂		1 л/т	290,2±0,65*	4,15±0,02*
СПКО ₃		1,5 л/т	307,7±0,58*	4,21±0,03*
Среднее значение			289,6±0,72	4,17±0,09

Примечание: * – $P \leq 0,05$

Наиболее стабильные результаты содержания СВ зафиксированы в вариантах с последовательным внесением Текацида (ПКО₂ и ПКО₃) и с одновременным, в виде смешанного раствора (СПКО₁). По этому показателю их можно отнести к первому классу. В этих вариантах содержание СВ достоверно превышало исходное значение в среднем на 4,3 г/кг ($P \leq 0,05$), а по сравнению с контролем – на 1,2 г/кг, что свидетельствует о протекании умеренных, но эффективных биологических процессов.

Аналогичную динамику наблюдали в варианте с Текацидом, а также при комбинированном внесении консервантов как последовательно (ПКО₁), так и совместно (СПКО₂). В этих вариантах содержание СВ достоверно превышало значение контроля (ПКК₀) на 1,9 г/кг ($P \leq 0,05$), по отношению к исходной массе – в среднем на 5,1 г/кг. Эти образцы демонстрировали значения, указывающие на преимущество этих схем, не смотря на сниженную концентрацию химического консерванта. Наиболее значительные изменения содержания СВ наблюдаются в образцах с препаратом Биотроф 2+ и в силосе, заготовленном комбинированным способом с внесением препаратов в смешанном виде СПКО₃ (1,5 л/т). Увеличение показателя в этих вариантах составило в среднем 6,4 г/кг ($P \leq 0,05$) по сравнению с исходной массой и 1,5 г/кг – к среднему значению по опыту. При этом следует особо подчеркнуть, что во всех силосах с комбинированным консервированием содержание СВ достоверно превышало значение корма с Биотроф 2+ ($P \leq 0,05$), что свидетельствует о более выраженном стабилизирующем эффекте смешанной схемы.

Интересно отметить, что даже при одинаковой дозе Текацида (1,5 л/т) при комбинированном консервировании концентрация СВ в готовом корме существенно зависело от способа внесения. При смешанном введении компонентов (СПКО₃) значение данного показателя была на 2,7 г/кг выше, чем при последовательной обработке (ПКО₃), что указывает на различие в механизме запуска и развития процессов ферментации. Последовательное внесение препаратов видимо способствовало развитию более благоприятных условий биохимических преобразований в процессе брожения.

Для комплексной оценки консервирующего эффекта и подтверждения выводов по показателю СВ требуется дальнейшее рассмотрение таких показателей, как уровень подкисления (табл. 2), концентрация органических кислот и их соотношение (рис. 3).

На основе расчётов, выполненных по формуле Вайсбаха и Спозни [12], установили, что при концентрации СВ в исходной массы на уровне 240,3 г/кг критическим значением кислотности, необходимым для ингибирования нежелательной микрофлоры и обеспечения микробиологической стабильности силосовой массы, pH не ниже 4,33. Поддержание кислотности на данном уровне в герметичных условиях препятствует развитию патогенных микроорганизмов – клостридий, дрожжей и плесневых грибов, и способствует сохранению ценных питательных веществ.

Степень подкисления консервируемой массы существенно зависела от дозы химического консерванта и способа его внесения (табл. 2). Контрольный образец (ПКК₀) достоверно ($P \leq 0,05$) показал более высокое значение pH по сравнению со всеми вариантами с добавками, за исключением варианта ПКК₁ (с использованием Биотроф 2+), что указывает на неэффективность спонтанного брожения в подавлении нежелательной микрофлоры. Величина pH в контроле на 0,37 единиц превышала среднее значение по остальным вариантам.

Отдельно стоит сказать о результатах подкисления в вариантах, заготовленных комбинированным консервированием с последовательным (ПКО₁₋₃) и смешанным (СПКО₁₋₃) внесением препаратов. Во всех образцах уровень pH не превышает значения 4,21, что говорит о хорошей способности данных схем в подкислении высокобелковой биомассы. При комбинированном консервировании с более низкой дозой внесения Текацида – СПКО₁ (2 л/т) и СПКО₂ (1 л/т) – pH снизился до 4,11 и 4,15 соответственно, что отвечает рассчитанному нами значению и требованиям ГОСТа. В силосах, законсервированных смесью с дозой химического консерванта (1,5 л/т) с последовательным (ПКО₃) и совместным внесением препаратов (СПКО₃), первый подкислялся несколько лучше, хотя оба по этому показателю отвечали требованиям к качественному корму.

Качество процессов брожения характеризуется общим количеством и составом органических кислот, накопленных во время силосования и их соотношением (рис. 2). Согласно результатам проведенных исследований, внесение Текацида и его смесей с Биотроф2+ достоверно ($P \leq 0,05$) положительно повлияло на кислотообразование. Их среднее содержание составило 36,8 г/кг СВ, что превышает контрольный образец на 7,8 г/кг. При этом в образце с применением Биотроф 2+ (ППК1) синтез органических кислот оказался ограниченным. Достоверно ($P \leq 0,05$) наибольшее кислотообразование установлено в силосах с комбинацией консервантов с последовательным внесением при дозе Текацида 3 л/т (вариант ПКО₂) и в смешанном виде при дозе Текацида 2 и 1,5 л/т (СПКО₂ и СПКО₃ соответственно). Важным показателем эффективности ферментации является преобладание молочной кислоты среди органических кислот. В ходе исследований установили, что во всех вариантах с консервантами её концентрация достоверно ($P \leq 0,05$) выше, чем в контроле (ПМК₀) в среднем на 13,9 г/кг. При этом в силосе с Биотроф2+ (ПМК₁) по сравнению со всеми вариантами комбинированного консервирования (ПКО₁₋₃ и СПКО₁₋₃) молочной кислоты достоверно ($P \leq 0,05$) меньше в среднем на 7 г/кг. Вероятно, это следствие недостаточной начальной концентрации сахаров и конкуренции с эпифитной микрофлорой. Уксусная кислота играет немаловажную роль в сохранности силоса, она обеспечивает его стабильность при хранении. Самое высокое содержание уксусной кислоты установили в контрольном образце (ПМК₀). Оно достоверно

($P \leq 0,05$) превышало значение большинства других вариантов на 3,7 г/кг. В вариантах с комбинированным внесением консервантов, особенно при пониженной дозе Текацида СПКО₁ и СПКО₂ с одновременным внесением, содержание уксусной кислоты выше, чем в корме с последовательной обработкой с дозой Текацида 5 (ПКО₁) и 3 (ПКО₂) л/т, в среднем на 1,4 г/кг ($P \leq 0,05$), что, вероятно, связано с особенностями микробного метаболизма при меньших концентрациях органических кислот. Одинаковое внесение Текацида в дозе 1,5 л/т при одновременном внесении препаратов способствовало большему накоплению уксусной кислоты на 2 г/кг СВ, чем при последовательной обработке. Анализ содержания масляной кислоты показал, что её наибольшее количество зафиксировано в вариантах ПМК₀ и ПМК₁, что указывает на развитие клостридиального брожения. В силосах с Текацидом (ПМК₂) и его комбинированным внесением в дозе 5 л/т (ПКО₁), 1,5 л/т (ПКО₃) и 1 л/т (СПКО₂) её образовалось достоверно ($P \leq 0,05$) меньше, чем в контрольном образце и корме с Биотроф 2+ в среднем в 7,2 и 5,5 раза соответственно, что подтверждает стабилизирующее действие химического компонента.

Следует подчеркнуть, что абсолютное количество органических кислот, накопленных в процессе силосования, не всегда является определяющим критерием качества ферментации. На практике наибольшее значение имеет их относительный состав (рис. 2), поскольку даже при одинаковом общем уровне кислот возможны принципиальные различия в характере брожения.

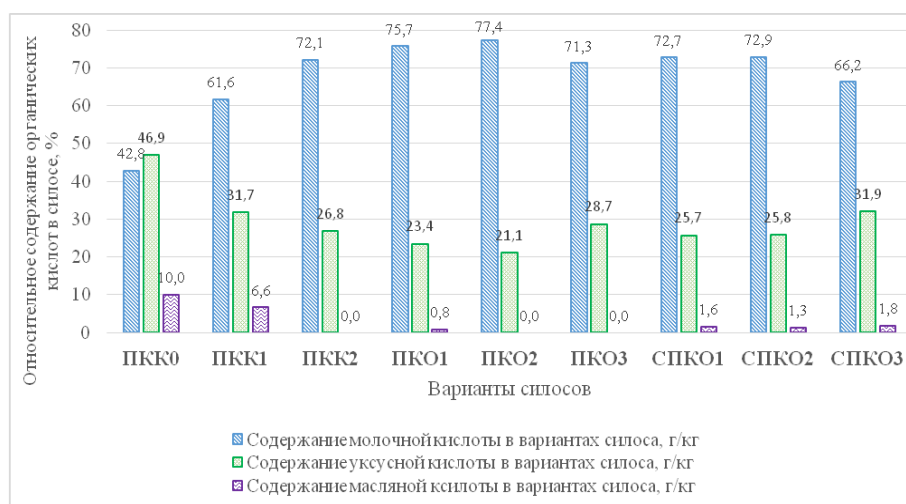


Рис. 2. Относительное содержание органических кислот в силосах из слабо проявленной массы козлятника, законсервированных разными способами

В контрольном образце (ПМК₀) молочная кислота составила 43 % от общего количества органических кислот, а масляная кислота – порядка 10 %, что свидетельствует о протекании нежелательных микробиологических процессов и позволяет отнести этот силос к категории вне классного по ГОСТ 55986-2022. В противоположность этому все варианты, включающие Текацид (ПМК₂, ПКО₁₋₃, СПКО₁₋₃),

продемонстрировали низкую относительную долю масляной кислоты и доминирование молочной, что соответствует силосам высокого качества. Наилучший профиль кислотного состава был установлен в образцах с внесением Текацида в дозе 5 л/т и в его сочетании с Биотроф 2+ с дозой последовательного внесения 3 и 1,5 л/т. В этих вариантах доля молочной кислоты достигала оптимальных значений, а

масляной кислоты не зафиксировали. Эти схемы обеспечили консервирующий эффект, сравнимый с чисто химическим. При этом расход дорогостоящего химического препарата ниже в 2 и более раз.

Корреляционный анализ, проведенный по методу Пирсона, позволил установить ряд закономерностей между содержанием СВ, уровнем pH и накоплением органических кислот. Положительная связь между содержанием СВ и концентрацией молочной кислоты ($r = 0,34$; $P \leq 0,05$), а также общим кислотообразованием ($r = 0,38$; $P \leq 0,05$). При этом содержание СВ отрицательно коррелирует с уксусной ($r = -0,17$; $P \leq 0,05$) и масляной кислотами ($r = -0,23$; $P \leq 0,05$), а также с уровнем pH ($r = -0,29$; $P \leq 0,05$). Это подтверждает, что при снижении кислотности и накоплении нежелательных метаболитов резко ухудшается питательная ценность силоса. Также установлена достоверная статистически значимая обратная корреляционная связь ($K=27$; $r = -0,44$; $P \leq 0,05$) между общим количеством накопленных органических кислот в вариантах силосов комбинированного консервирования с последовательным и одновременным внесением консервантов, что позволяет нам говорить о различиях в протекании процессов брожения.

Обсуждение

Исследования проводимые для определения влияния различных подходов к комбинированному консервированию слабопроявленной биомассы Галеги восточной на основании анализа уровня активной кислотности, состава и соотношения органических кислот, сохранности СВ и качества готового корма в целом показали, что результаты зависели как от концентрации химического консерванта, так и от способа внесения препаратов.

Анализ показателей исходной массы подтвердил, что биомасса Галеги восточной относится к трудносилосуемой. На этот факт указывают многие авторы [13, 14]. Улучшить процесс силосования позволяет проявление, так как оно способствует повышению содержания сахара [15-17]. Количество сахара, определенное в исходной массе, согласуется с результатами исследования О. Ганущенко [13]. Он установил, что данный показатель в фазу начала цветения составил 49,0 г/кг СВ сахаров при уровне СВ 17,8 %. При этом буферная ёмкость составляла 4,8 % в СВ, сахаро-буферное отношение 1,02, а коэффициент сбраживаемости – 26. По мнению автора, чтобы получить качественный силос из высокобелковых растений, исходное сырье обязательно нужно проявлять. Известно, что с ростом содержания СВ повышается степень гомоферментативности молочнокислого брожения [16].

В условиях интенсивного молочнокислого брожения и оптимального подкисления уровень СВ в готовом силосе сохраняется на уровне, близком к исходному. Незначительное изменение данного показателя (<2...3 %) свидетельствует о протекании процессов преимущественно по гомоферментативному типу с минимальными потерями органических

веществ и энергии. Во всех исследуемых образцах наблюдали увеличение содержания СВ по сравнению с исходной массой в среднем на 49,3 г/кг. Следует отметить, что его сохранность напрямую зависит от степени подкисления консервируемой массы. При этом процесс кислотообразования зависит от состава питательной среды и от условий культивирования [18]. Быстрое подкисление на начальном этапе силосования гарантирует подавление патогенной эпифитной микрофлоры [5, 6]. Это мы наблюдали и в ходе проведения опыта. Уровень активной кислотности в схемах комбинированного консервирования не превышал 4,21. Его снижение происходит благодаря накоплению молочной кислоты. После 35...45 дней хранения её содержание в качественном силосе должно в два-три раза превосходить содержание уксусной кислоты. Повышение доли молочной кислоты эффективно подавляет развитие нежелательной микрофлоры и способствует стабилизации силоса. Это подтверждается вышеприведенными результатами и данными исследований других авторов [12, 13]. При этом содержание уксусной кислоты обеспечивает стабильность готового корма и препятствуя его самосогреванию. Стоит отметить, что она также оказывает влияние на жирность молока. Желательно, чтобы её содержалось в силосе не более 3 % от СВ. Как показали результаты проведенных исследований, при комбинированном консервировании ее значение не превышало 1 %. Даже в контрольном варианте ее массовая доля составила 1,36 % от СВ. Самой нежелательной в корме является масляная кислота. Ряд авторов указывает, что заготовить силос из высокобелкового сырья без наличия масляно-кислого брожения невозможно без химического консервирования [13, 17]. В готовом корме с химическим препаратом Текацид ПКК₂ (5 л/т) и его комбинировании с Биотроф 2+ в вариантах ПКО₂ (3 л/т) и ПКО₃ (1,5 л/т) её не обнаружили.

Проведенные исследования подтвердили, что эффективность комбинированного консервирования обусловлена способностью органических кислот подавлять развитие клостридий и иных патогенов на ранних стадиях ферментации. Результаты исследований ряда авторов [6, 7, 10] также подтверждают, что и в настоящее время наиболее эффективными остаются препараты на основе органических кислот – муравьиной, пропионовой, уксусной, бензойной, сорбиновой и их солей. Использование бактериального препарата Биотроф 2+ в составе комбинированной схемы позволяет обеспечить микробиологическую доминанту благоприятной микрофлоры на начальной стадии, что ускоряет подкисление биомассы и повышает качество ферментативных процессов. Численное превосходство молочнокислых бактерий на начальной стадии силосования способствует более быстрой инициации продуцирования молочной кислоты, что обеспечивает стабильное подкисление массы за более короткие сроки [18, 19].

Положительный эффект сочетания консервантов различной природы подтверждается и другими авторами [10].

Заключение

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность применения комбинированного консервирования слабо проявленной биомассы Галеги восточной. На основании оценки биохимических показателей опытных силосов, включающих уровень активной кислотности, содержание и профиль органических кислот, установили, что последовательное внесение Текацида в доза 1,5 (ПКО₃) и 3 л/т (ПКО₂) в сочетании с бактериальным препаратом Биотроф 2+ позволяет достичь стабильного и высококачественного брожения. В образцах отмечено снижение pH до нормативных значений (в среднем 4,04), доминирование молочной кислоты при низком содержании уксусной (менее 30 %) и практически полном отсутствии масляной кислоты. Полученные данные указывают на преимущественно гомоферментативный тип молочнокислого брожения, обеспечивающий высокую питательную ценность и стабильность силоса. Полученные результаты имеют практическое значение, обусловленное применением комбинированного консервирования с пониженной дозой Текацида (3...1,5 л/т), что позволяет снизить расход дорогостоящего химического компонента на 70...40 % при сохранении качества готового корма.

Литература

1. Ignaczak S., Andrzejewska Ja., Katarzyna S. Fodder Galega-Persistence as a Special Asset in Sustainable Agriculture // *Agronomy* 13. 2023. Vol. 10. P. 2587. doi: 10.3390/agronomy131025872023
2. Использование силоса из бобово-злаковых травосмесей в рационах откармливаемых бычков / Б. Г. Шарифьянов, И. Ф. Юмагузин, Ф. М. Шагалиев и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35 № 2. С. 56-60. doi:10.24411/0235-2451-2021-10209
3. Пастбища и их роль в кормлении молочного скота в условиях европейского Севера РФ / Е. Тяпугин, И. Сереброва, Г. Симонов и др. // *Молочное и мясное скотоводство*. 2011. № 5. С. 23-24.
4. Косолапова Е. В., Кучин Н. Н., Косолапов В. В. Силосование: современные подходы к консервированию трудносилосуемых растений: монография. Москва: ИНФРА-М. 2024. 216 с. doi 10.12737/2061201.
5. Симонов Г. А., Старковский Б. Н., Симонов А. Г. Качество кормов из козлятника восточного // *Молочнохозяйственный вестник*. 2021. Т. 41. № 1. С. 81-88. doi 10.52231/2225-4269_2021_1_81
6. Усков Г. Е., Цопанова А. В., Усков И. Г. Химическое консервирование бобовых культур // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2017. № 5 (3). С. 52-58. doi: 10.14529/food170307
7. Волкова Г. С., Куксова Е. В. Применение консервантов различной природы для заготовки кормов // *Эффективное животноводство*. 2020. Т.160. № 3. С. 124-125. doi:10.24411/9999-007A-2020-00011
8. Бикчантаев И. Т., Аскарова А. А. Эффективность применения биологических препаратов при консервировании люцерны // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 11. С. 18–21. doi: 10.24411/0235-2451-2019-11104.
9. Хохряков Г. А., Кислякова Е. М. Биологические консерванты при силосовании кормовых культур как фактор, обуславливающий молочную продуктивность коров // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 79. № 5. С. 226-229.
10. Латышева О. В. О самом эффективном способе консервирования / *Эффективное животноводство*. 2021. Т. 169. № 3. С. 53-54.
11. Пат. 2614799 RU МПК А23К 30/15 Способ консервирования зеленой массы / Е. В. Косолапова, Н. Н. Кучин, В. В. Косолапов; заявитель и патентообладатель Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный инженерно-экономический университет – № 2015124848 Заяв. 24.06.2015 // *Изобретения*. – Опубликовано 29.03.2017.
12. Носов Н. М., Малинин И. И. Проблемы клостридиальной порчи корма // *Сельскохозяйственные вести*. 2012. № 1. С. 26–28.
13. Ганущенко О. Консервирование многолетних бобовых трав // *Животноводство России*. 2020. № 5. С. 45-50. doi 10.25701/ZZR.2020.80.94.018
14. Победнов Ю. А., Мамаев А. А. Интенсивность спиртового брожения в зависимости от степени подсушивания травы, наличия сахара, а также его роль в возникновении аэробной порчи силоса и сенажа // *Адаптивное кормопроизводство*. 2019. № 1. С. 55-67. doi:10.33814/AFP-2222-5366-2019-1-56-68
15. Победнов Ю. А., Косолапов В. М. Биологические основы силосования люцерны с препаратами молочнокислых бактерий (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2018. Т. 53. № 2. С. 58-269. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.258rus
16. Effect of wilting time and enzymatic-bacterial inoculant on the fermentative profile, aerobic stability and nutritional value of BRS capiaçu grass silage / W. F. G. Ribas, F. P. Monção, V. R. R. Júnior, et al. // *R Bras Zootec.* 2021. Vol. 50. P. 20200207. doi: 10.37496/rbz5020200207
17. Effects of wilting on silage quality: a meta-analysis / M. Ridla, H. R. Albarki, S. T. Risyahadi, et al. // *Anim Biosci.* 2024. Vol. 37. No. 7. P. 1185-1195. doi: 10.5713/ab.23.0403
18. Абдуллаева Н. Ф., Тагизаде З. А., Мустафаева Р. С. Микробиологические и биохимические характеристики молочнокислых бактерий и области их применения (обзор) // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 3-3. С. 31-35.
19. Эффективность применения пробиотиков при консервировании зернофуража повышенной влажности / Н. Федак, С. Чумаченко, Л. Дармограй и др. // *Stiinta Agricola*. 2020. № 1. С. 167-172. doi: 10.5281/zenodo.3911647

References

1. Ignaczak S., Andrzejewska Ja., Katarzyna S. "Fodder Galega - Persistence as a Special Asset in Sustainable Agriculture" // *Agronomy* 13. 2023. Vol. 10. R. 2587. doi: 10.3390/agronomy131025872023
2. Usage of silage from legume-cereal grass mixtures in the diets of fattened bulls / B. G. Sharifyanov, I. F. Yumaguzin, F. M. Shagaliev, et al. // *Achievements of science and technology in the agro-industrial complex*. 2021. Vol. 35, No. 2, P. 56-60. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10209
3. Pastures and their role in feeding of dairy cattle in the conditions of the European North of the Russian Federation / E. Tyapugin, I. Serebrova, G. Simonov, D. Serebrov // *Dairy and meat cattle breeding*. 2011. No. 5, P. 23-24.
4. Kosolapova E. V., Kuchin N. N., Kosolapov V. V. *Ensilaging: Modern approaches to preserving difficult-to-ensilage plants: Monograph*. Moscow: INFRA-M. 2024. 216 p. doi 10.12737/2061201.
5. Simonov G. A., Starkovsky B. N., Simonov A. G. Quality of feed from Eastern Galega // *Dairy Farming Vestnik*. 2021. Vol. 41. No. 1. P. 81-88. doi 10.52231/2225-4269_2021_1_81
6. Uskov G. E., Tsopanova A. V., Uskov I. G. Chemical preservation of legumes // *Vestnik of the South Ural State University*. 2017. No. 5 (3). P. 52-58. doi: 10.14529/food170307
7. Volkova G. S., Kuksova E. V. Usage of preservatives of various nature for feed preparation // *Effective animal husbandry*. 2020. Vol. 160. No. 3. P. 124-125. doi: 10.24411/9999-007A-2020-00011
8. Bikchantayev I. T., Askarova A. A. Efficiency of using biological preparations in canning alfalfa // *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2019. Vol. 33. No. 11. P. 18-21. doi: 10.24411/0235-2451-2019-11104.
9. Khokhryakov G. A., Kislyakova E. M. Biological preservatives in ensiling forage crops as a factor determining milk productivity of cows // *Vestnik of the Orenburg State Agrarian University*. 2019. Vol. 79. No. 5. P. 226-229.
10. Latysheva O. V. On the most effective method of preservation / *Effective animal husbandry*. 2021. Vol. 169. No. 3. P. 53-54.
11. Pat. 2614799 RU IPC A23K 30/15 Method for preserving green mass / E. V. Kosolapova, N. N. Kuchin, V. V. Kosolapov; applicant and patent holder State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics – No. 2015124848 Applied. 24.06.2015 // *Inventions*. – Published on 29.03.2017.
12. Nosov N. M., Malinin I. I. Problems of clostridial spoilage of feed // *Agricultural News*. 2012. No. 1. P. 26-28.
13. Ganushchenko O. Preservation of perennial legumes // *Animal Husbandry of Russia*. 2020. No. 5. P. 45-50. doi 10.25701/ZZR.2020.80.94.018
14. Pobednov Yu. A., Mamaev A. A. The intensity of alcoholic fermentation depending on the degree of grass drying, the presence of sugar and its role in the aerobic spoilage of silage and haylage // *Adaptive Feed production*. 2019. No. 1. P. 55-67. doi:10.33814/AFP-2222-5366-2019-1-56-68
15. Pobednov Yu. A., Kosolapov V. M. Biological foundations of ensiling alfalfa with lactic acid bacteria preparations (review) // *Agricultural biology*. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 58-269. doi: 10.15389/agrobiol-ogy.2018.2.258rus
16. Effect of wilting time and enzymatic-bacterial inoculant on the fermentative profile, aerobic stability and nutritional value of BRS capiaçu grass silage / W. F. G. Ribas, F. P. Monção, V. R. R. Júnior, et al. // *R Bras Zootec.* 2021. Vol. 50. P. 20200207. doi: 10.37496/rbz5020200207
17. Effects of wilting on silage quality: a meta-analysis / M. Ridla, H. R. Albarki, S. T. Risyahadi, et al. // *Anim Biosci.* 2024. Vol. 37. No. 7. P. 1185-1195. doi: 10.5713/ab.23.0403
18. Abdullaeva N. F., Tagizade Z. A., Mustafayeva R. S. Microbiological and biochemical characteristics of lactic acid bacteria and their applications (review) // *Current problems of humanitarian and natural sciences*. 2017. No. 3-3. P. 31-35.
19. Efficiency of probiotic usage in preserving high-moisture grain forage / N. Fedak, S. Chumachenko, L. Darmograi, et al. // *Stiinta Agricola*. 2020. No. 1. P. 167-172. doi: 10.5281/zenodo.3911647

Использование обменной энергии курами кроссов «Родонит» и «Бованс белый» в разные периоды яйцекладки

В. В. Наумова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Морфология и физиология, кормление, разведение и частная зоотехния»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

zootech-dep@ugsha.ru

Резюме. Статья посвящена изучению расхода обменной энергии у кур разной наследственности и влияния основного обмена на яичную продуктивность. Целью исследований стало сравнительное изучение основных процессов использования обменной энергии на разных этапах яйцекладки у кур-несушек кроссов «Родонит» и «Бованс белый», а также выявление воздействия уровня основного обмена и теплового обеспечения на продуктивные качества. Исследование проведено на птицефабрике в Ульяновской области, на курах, аналогичных по методам выращивания, возрасту, технологиям содержания и кормления. Учитывали три направления использования обменной энергии – на основной обмен (базовый метаболизм), на синтез продукции и затраты на теплообеспеченность организма. Разные направления расхода обменной энергии определяли в одинаковых единицах учета системы СИ, в кДж. Куры кросса «Бованс белый» превосходили по яйценоскости кросс «Родонит» в среднем за три периода яйцекладки на 11 %, использованию обменной энергии на 9,7 %. Куры этого кросса более высокую долю ОЭ направляют на синтез яйцепродукции: 21,8 % – в начальный период яйцекладки, 27,8 % – в период наивысшей яйценоскости и 24,2 % – в конце яйцекладки против 17,7...24,1...19,5 % у кросса «Родонит». Расходы на теплообеспеченность организма на килограмм живой массы у кур кросса «Бованс белый» выше по сравнению с кроссом «Родонит» на 3,6 %. У кросса «Бованс белый» прослеживается тесная корреляционная связь между базовым метаболизмом и расходами на формирование яйца - $r=0,892$, у кросса «Родонит» она значительно слабее - $r = 0,630$. Более высокая продуктивность кросса «Бованс белый» обусловлена эффективным усвоением обменной энергии и повышенной активностью обменных процессов.

Ключевые слова: куры, кроссы, основной обмен, теплообеспеченность, синтез яиц, функции взаимодействия.

Для цитирования: Наумова В.В. Использование обменной энергии курами кроссов «Родонит» и «Бованс белый» в разные периоды яйцекладки // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 128-134. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-128-134

The use of metabolic energy by chickens of the «Rhodonite» and «Bovans» White crosses during different periods of egg laying

V.V. Naumova

Ulyanovsk State Agrarian University

432000, Ulyanovsk, Novy Venets Boulevard, 1

zootech-dep@ugsha.ru

Abstract. This article examines the metabolic energy expenditure of hens with different genetic backgrounds and the impact of basal metabolic rate (BMR) on egg production. The aim of the study was to comparatively examine the key processes of metabolizable energy utilization at different egg-laying stages in Rodonit and Bovans White laying hens, as well as to identify the impact of BMR and heat on egg production. The study was conducted at a poultry farm in the Ulyanovsk region, using chickens with similar rearing methods, age, housing technologies, and feeding. Three directions of metabolizable energy use were taken into account: basal metabolism, product synthesis, and body heat costs. Different directions of metabolizable energy expenditure were determined in the same SI units, kJ. Chickens of the Bovans White cross outperformed the Rodonit cross in egg production by an average of 11% over three egg-laying periods, and in metabolizable energy use by 9.7%. Chickens of this cross direct a higher proportion of metabolizable energy to egg production synthesis: 21.8% in the initial period of egg production, 27.8% during the period of peak egg production, and 24.2% at the end of egg production, compared to 17.7–24.1–19.5% for the Rodonit cross. Heat expenditure per kilogram of live weight is 3.6% higher in the Bovans White cross compared to the Rodonit cross. The Bovans White cross shows a strong correlation between basal metabolic rate and egg production expenditure ($r = 0.892$), while the Rodonit cross shows a significantly weaker correlation ($r = 0.630$). The higher productivity of the Bovans White cross is due to the efficient utilization of metabolizable energy and increased metabolic activity.

Keywords: chickens, crosses, basal metabolic rate, heat supply, egg synthesis, interaction functions.

For citation: Naumova V.V. The use of metabolic energy by chickens of the «Rhodonite» and «Bovans» white crosses during different periods of egg laying // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 128-134 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-128-134

Введение

Современное яичное производство базируется на использовании высокопродуктивной гибридной птицы. Специализированные яичные кроссы характеризуются выдающейся продуктивностью, позволяющей получать от одной курицы-несушки 310...330 яиц в год, формируя более 20 кг яичной массы [1, 2]. Одной из ключевых особенностей высокопродуктивных кроссов является их способность к эффективному использованию питательных веществ корма, затраты корма на 10 яиц – 1,2...1,3 кг [3, 4].

За год одна курица-несушка способна снести яйца, масса которых в 10...22 раза больше ее собственного веса. Высокая яйценоскость, обусловленная интенсивным метаболизмом, небольшие размеры и способность хорошо адаптироваться к различным условиям позволили птице занять лидирующие позиции в сфере промышленного животноводства, делая ее одним из самых выгодных объектов для разведения [5, 6, 7].

Куры-несушки являются лидерами среди животных по производству биологически полноценного белка. Так, курица, несущая за год 250 яиц, вырабатывает около 875 г белка на каждый килограмм своей массы. Для сравнения, корова, дающая за год 5000 кг молока, производит всего лишь 275 г белка на килограмм своей массы [8].

Факторы, влияющие на яичную продуктивность птицы, включают генетическую предрасположенность, условия внешней среды – питание, климатические параметры, уровень ухода, а также внутреннее физиологическое состояние и метаболизм организма [9, 10].

Интенсивность яйцекладки у кур не является постоянной на протяжении всего периода. Молодые куры современных кроссов обычно начинают нестись в возрасте 120...150 дней, и их рост продолжается до 300...360 дней. Наиболее высокая яйценоскость отмечается в первые 3...4 месяца после наступления половой зрелости. В этот период, когда наблюдается быстрое увеличение как количества снесенных яиц, так и живой массы птицы, кормление должно учитывать как потребности в продуктивности (образование яиц и набор веса), так и поддерживающие нормы для нормального функционирования организма.

По завершении роста кур, что обычно происходит к 300 дням жизни и сопровождается стабилизацией их массы, прекращается потребность в дополнительном питании, направленном на увеличение живой массы.

Начиная с 4-го и по 10-й месяц яйцекладки, наблюдается постепенное снижение интенсивности яйцекладки. Основным фактором, определяющим этот спад продуктивности, является генетически заложенный потенциал птицы, влияющий на уровень и длительность периода яйценоскости.

Примерно к 420...450 дню жизни у кур-несушек происходят метаболические изменения. Организм

при избытке питательных веществ начинает более активно откладывать жир (внутренний и подкожный), что приводит к увеличению живой массы, поэтому на заключительном (третьем) этапе кормления необходимо дополнительно снизить содержание протеина и других питательных веществ в рационе. Это позволяет поддерживать оптимальную продуктивность, заложенную генетически, одновременно предотвращая ожирение птицы и не допуская чрезмерного увеличения массы яиц на поздних стадиях яйцекладки [11].

В отличие от многих других видов животных птицы обладают более высоким уровнем метаболизма. Это обуславливается высокой эффективностью их пищеварительной системы, которая быстро перерабатывает полученную пищу [12].

Генетические исследования и селекционная работа позволили значительно ускорить обмен веществ у современных кроссов птицы. Это означает, что критически важным фактором становится способность пищеварительной системы птицы максимально быстро вовлекать питательные вещества комбикорма в биосинтетические процессы организма [13].

Поступление энергии в организм птицы является ключевым фактором, определяющим на 40...50 % ее продуктивность. Недостаток энергии часто приводит к тому, что птица вынуждена потреблять больше комбикорма, но при этом ее продуктивность остается низкой, в отличие от птиц, получающих достаточное количество энергии.

Образование энергии в организме происходит за счёт окисления питательных веществ. Точнее определить объём энергии, который может быть использован птицей из рациона, сегодня позволяет показатель обменной энергии.

Степень усвоения энергии питательных веществ зависит от генетической предрасположенности птицы, условий кормления и содержания [6, 7, 8].

Анализ наследственных факторов, влияющих на энергопотребление в яичном птицеводстве, является актуальным.

Цель исследования – изучение особенностей использования обменной энергии у кур-несушек кроссов «Родонит» и «Бованс белый» на разных этапах яйцекладки, а также выявление воздействия уровня основного обмена и теплового обеспечения на показатели продуктивности.

Материалы и методы

Эксперимент проведен в условиях птицефабрики «Ульяновская» Чердаклинского района в Ульяновской области. Объектом изучения послужили кроссы «Родонит» и «Бованс белый». Исследование выполнено в разные периоды яйцекладки кур. Плотность посадки, фронт кормления, световой режим в исследуемых группах были одинаковыми и соответствовали нормам.

Учитывали три направления использования обменной энергии – на основной обмен (базовый метаболизм), на синтез яичной продукции и затраты на

теплообеспеченность организма (*Энергетический обмен у сельскохозяйственных животных / Е. А. Надаляк, С.В. Стояновский // В кн. Руководство по физиологии. Л. Наука 1978. С. 255-280*).

Основной обмен определяли по развитию живой массы $y = a \cdot x^n$ (*Биометрия / Н.А. Плохинский. М., 1970. 368 с.*). Для птиц предложено уравнение $R_{\text{ккал}} = 86,4 \times M^{0,668}$ (*Размеры животных: почему они так важны? К. Шмидт -Ниельсен. Москва: Мир, 1987. 259 с.*).

Энергетическая ценность яичной продуктивности оценивалась в килоджоулях – кДж в соответствии

с утвержденными нормативами. Для кур 100 г = 157 ккал или 657 кДж [14].

Принята единая оценка изучаемых процессов в кДж в соответствии с международной Системой единиц «СИ». Проведен корреляционный и регрессионный анализы с определением управляющих аргументов и управляемых функций.

Результаты

В таблице 1 приведены морфофизиологические и продуктивные показатели кур разных кроссов в разные периоды яйцекладки.

Таблица 1. Морфофизиологические и продуктивные показатели кур

№ п/п	Показатель	Кросс «Родонит»	Кросс «Бованс белый»	+
		M+m	M+m	
начало яйцекладки (154 дня)				
1	Живая масса, кг	1,75+15,86	1,49+18,60	+0,26
2	Поверхность тела, см ²	10,6	7,70	+2,9
3	Яичная продуктивность, г/сут.	30,7+0,36	34,4+0,35	-3,7
4	Использовано ОЭ, кДж/кг/сут.	651,5	696,2	-44,7
интенсивный период яйцекладки (280 дней)				
1	Живая масса, кг	1,87+36,70	1,53+11,90	+0,34
2	Поверхность тела, см ²	12,10	8,12	+3,98
3	Яичная продуктивность, г/сут.	45,7+0,31	48,4+0,48	-2,7
4	Использовано ОЭ, кДж/кг/сут.	666,8	747,1	-80,3
Завершение яйцекладки (476 дней)				
1	Живая масса, кг	1,90+29,30	1,61+15,30	+0,29
2	Поверхность тела, см ²	12,50	8,99	+3,51
3	Яичная продуктивность, г/сут.	33,8+0,37	39,2+0,33	-5,4
4	Использовано ОЭ, кДж/кг/сут.	600,3	660,9	-60,6

Живая масса кур кросса «Родонит» превосходит показатель кросса «Бованс белый» на 17,4...22,2 %. Площадь поверхности тела у кур «Родонит» оказалась больше в 1,38...1,49 раза.

Куры кросса «Бованс белый» на протяжении всего периода яйцекладки лучше использовали обменную энергию по сравнению с кроссом «Родонит». В начальный период продуктивности затраты обменной энергии на килограмм живого веса у них превышали аналогичные показатели кросса «Родонит» на 44,7 кДж (6,9 %), в период интенсивной яйцекладки на 80,3 кДж (12,0 %) и в конце яйценоскости на 60,6 кДж (10,1 %).

В начале яйцекладки несушки кросса «Бованс белый» откладывают на 3,7 г (12,1 % больше) яиц в день, чем несушки кросса «Родонит». В период максимальной продуктивности разница составляет 2,7 г (5,9%), а к завершению яйцекладки она увеличивается до 5,4 г (16,0 %).

Структура расхода обменной энергии в разные периоды яйцекладки приводится в таблице 2.

Существуют заметные различия в энергетических затратах между кроссами «Родонит» и «Бованс белый» в период яйцекладки. Куры кросса «Родонит» в начале яйцекладки на основной обмен затрачивают 46,0 %, в пик яйценоскости – 44 % и в конце яйцекладки – 48,7 % ОЭ. Кросс «Бованс белый» на базовый метаболизм расходует несколько меньше обменной энергии соответственно 45,3 %, 42,0 % и 46,8 %.

Научно обоснованные нормы расхода обменной энергии для кросса «Родонит» выше по сравнению с кроссом «Бованс белый». Это связано с тем, что куры кросса «Родонит» имеют большую живую массу. Однако, удельный расход энергии (на 1 кг живой массы) у «Бованс белый» выше: в начальный период яйцекладки потребление энергии на 1 кг живой массы было больше на 35,9 кДж, в фазу активной яйцекладки – на 20,1 кДж, а к завершению продуктивного цикла – на 16,6 кДж по сравнению с курами кросса «Родонит».

Одним из ключевых критериев эффективности основного обмена считаются затраты энергии на образование яиц. Кросс «Бованс белый» более высокую долю ОЭ направляет на синтез яйцепродукции, 21,8 %, – в начальный период яйцекладки, 27,8 % – в период наивысшей яйценоскости и 24,2 % – в конце яйцекладки против 17,7...24,1...19,5 % у кросса «Родонит».

В начальный период яйцекладки куры кросса «Бованс белый» используют на синтез яиц больше на 24,4 кДж обменной энергии ежедневно по сравнению с курами кросса «Родонит». В период максимальной продуктивности эта разница сокращается до 17,8 кДж в сутки, однако «Бованс белый» продолжают показывать более высокое потребление энергии. В завершающий этап яйцекладки энергозатраты у кур кросса «Бованс белый» превышают показатели «Родонит» на 35,2 кДж ежедневно.

Таблица 2. Структура и состояние основных процессов использования обменной энергии в разные периоды яйцекладки кур

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Кресс «Родонит»	Кресс «Бованс белый»	+
			M+m	M+m	
начало яйцекладки					
1	Валовая энергия (ВЭ)	кДж	1584	1441	+143
2	Обменная энергия (ОЭ)	кДж	1140,2	1037,4	+102,8
3	Основной обмен (ОО)	кДж	524,7+3,2	469,7+4,0	+55,4
	на кг живой массы	кДж/кг	279,2	315,1	-35,9
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг	2,6	2,1	+0,5
4	Яйцепродукция	кДж	201,6+2,4	226,0+2,3	-24,4
	на кг живой массы	кДж/кг	107,3	151,6	-44,3
	в минуту	кДж/мин.	0,14	0,16	- 0,02
5	Теплообеспеченность	кДж	413,9+5,5	341,7+6,2	+72,2
	на кг живой массы	кДж/кг	220,2	229,2	-9
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг	2,1	1,5	+0,6
интенсивный период яйцекладки					
1	Валовая энергия (ВЭ)	кДж	1732	1588	+144
2	Обменная энергия (ОЭ)	кДж	1247	1143	+104
3	Основной обмен (ОО)	кДж	548,7+7,2	480,4+2,5	+69
	на кг живой массы	кДж/кг	293,7	313,8	-20,1
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг	1,83	1,50	+0,33
4	Яйцепродукция	кДж	300,4+2,1	318,2+3,2	-17,8
	на кг живой массы	кДж/кг	160,8	207,9	-40
	в минуту	кДж/мин.	0,21	0,22	- 0,01
5	Теплообеспеченность	кДж	397,7+8,9	344,5+5,6	+54
	на кг живой массы	кДж/кг	212,9	225,0	-6
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг	1,3	1,1	+0,2
завершение яйцекладки					
1	Валовая энергия (ВЭ)	кДж	1584	1478	+106
2	Обменная энергия (ОЭ)	кДж	1140,6	1064,1	+76,5
3	Основной обмен (ОО)	кДж	555,4+5,7	497,5+3,1	+57,9
	на кг живой массы	кДж/кг	291,9	308,5	-16,6
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг			
4	Яйцепродукция	кДж	222,3+2,4	257,5+2,2	-35,2
	на кг живой массы	кДж/кг	116,8	159,7	-42,9
	в минуту	кДж/мин.	0,15	0,18	- 0,03
5	Теплообеспеченность	кДж	362,9+8,0	309,1+5,2	+53,8
	на кг живой массы	кДж/кг	190,7	191,7	-1
	на кДж яйцепродукции	кДж/кг	1,63	1,2	+0,43

Таблица 3. Регрессионный анализ основных процессов использования обменной энергии

№ п/п	Показатель	Начало яйцекладки		Интенсивный период яйце- кладки		Завершение яйцекладки	
		кросс «Родо- нит»	кросс «Бованс белый»	кросс «Родо- нит»	кросс «Бованс белый»	кросс «Родо- нит»	кросс «Бованс белый»
Основной обмен (ОО) - продуктивность							
1	Даты, М+м	524,7+ 3,2 201,6+2,4	469,7+ 4,0 226,0+2,3	548,7+ 7,2 300,4+ 2,1	480,4+ 2,5 318,2+ 3,2	555,4+ 5,7 222,3+ 2,4	497,5+ 3,1 257,5+ 2,2
2	Сигма, σ	7,8-5,81	9,8-5,59	17,65-5,05	6,12-7,79	14,01-5,96	7,71-5,33
3	Корреляция, r	0,520	0,964	0,774	0,838	0,597	0,874
4	Регрессия, R _{1/2}	0,698	1,69	2,71	0,66	1,40	1,26
5	Регрессия, R _{2/1}	0,39	0,55	0,22	1,07	0,25	0,60
6	Детерминанта, r ²	0,270	0,929	0,599	0,702	0,356	0,763
Основной обмен (ОО) - теплообеспеченность							
1	Даты, М+м	524,7+ 3,2 413,9+5,5	469,7+ 4,0 341,7+ 6,2	548,7+ 7,2 397,7+ 8,9	480,4+ 2,5 344,5+ 5,6	555,4+ 5,7 362,9+ 8,0	497,5+ 3,1 309,1+ 5,2
2	Сигма, σ	7,8-13,4	9,8-15,3	17,7-21,8	6,1-13,8	14,0-19,7	7,7-12,7
3	Корреляция, r	- 0,908	- 0,995	- 0,989	- 0,946	- 0,993	- 0,979
4	Регрессия, R _{1/2}	- 0,53	- 0,64	- 0,80	- 0,42	- 0,71	- 0,59
5	Регрессия, R _{2/1}	-1,56	-1,55	-1,22	- 2,14	- 1,40	-1,61
6	Детерминанта, r ²	0,824	0,990	0,978	0,895	0,986	0,958
Теплообеспеченность - продуктивность							
1	Даты, М+м	413,9+5,5 201,6+2,4	341,7+ 6,2 226,0+2,3	397,7+ 8,9 300,4+ 2,1	344,5+ 5,6 318,2+ 3,2	362,9+ 8,0 222,3+ 2,4	309,1+ 5,2 257,5+ 2,2
2	Сигма, σ	13,4-5,8	15,3-5,6	21,8-5,1	13,8-7,8	19,7-5,96	12,7-5,3
3	Корреляция, r	-0,829	- 0,985	- 0,854	-0,968	-0,669	- 0,955
4	Регрессия, R _{1/2}	-1,92	-2,69	- 3,65	-1,71	-2,21	-2,29
5	Регрессия, R _{2/1}	- 0,36	-0,36	- 0,20	-0,55	-0,20	-0,40
6	Детерминанта, r ²	0,687	0,970	0,729	0,937	0,448	0,912

Использование обменной энергии на синтез яиц к концу яйцекладки снизился у обеих кроссов. Однако, кросс «Бованс белый» демонстрирует меньшее снижение относительно пика яйценоскости – на 23,6 %, тогда как у кросса «Родонит» на 35,1 %. Такая тенденция свидетельствует о потенциально более продолжительном продуктивном периоде у кросса «Бованс белый».

Куры кросса «Бованс белый», наряду с более высокой яйценоскостью, обладают улучшенной способностью к терморегуляции. Расход энергии на поддержание теплового баланса у кросса «Родонит» составлял 31,8...36,3 % от общей энергетической потребности, у кросса «Бованс белый» – 29...32 % от ОЭ. Однако, энергозатраты на теплообеспеченность организма в расчете на 1 кг живой массы кур в течение всех фаз яйцекладки выше у кросса «Бованс белый».

Расход энергии на поддержание температуры тела у кур кросса «Бованс белый» достигает 229,2 кДж на 1 кг живой массы во время начала яйцекладки. В фазу максимальной яйценоскости этот показатель составляет 225,0 кДж/кг, а к завершению биологического цикла снижается до 191,7 кДж/кг. Эти значения превосходят аналогичные показатели кросса «Родонит», где расходы энергии составляют 220,2 кДж/кг, 212,9 кДж/кг и 190,7 кДж/кг соответственно. Преимущество кросса «Бованс белый» по теплообеспеченности организма в начале яйценоскости составляет 9 кДж/кг, в пик кладки – 12,1 кДж/кг, а к концу цикла – 1 кДж/кг.

Изученные кроссы кур имеют различия по развитию и направлению взаимодействия основных процессов использования затрат обменной энергии (табл.3).

У кур кросса «Бованс белый» высокая степень влияния основного обмена на яйценоскость. Максимальная корреляция зафиксирована в начальном периоде яйцекладки - $r=0,964$, тогда как у кур кросса «Родонит» эта зависимость выражена слабее, $r=0,520$, что на 85,4 % меньше.

В периоды интенсивной и завершающей яйцекладки у «Бованс белый» сохраняется высокая степень взаимосвязи между основным обменом и продуктивностью ($r=0,838$ и $r=0,874$). У «Родонит» эти показатели также демонстрируют более низкие значения: $r=0,774$ (на 8,3 % ниже) и $r=0,597$ (на 46,4 % ниже).

Между базовым метаболизмом и теплообеспеченностью установлена отрицательная регрессия.

Отражением метаболических процессов организма являются показатели крови. По данным биохимического анализа крови у кур с повышенной яйценоскостью наблюдаются более высокие показатели иммунной устойчивости [15].

У кросса «Бованс белый» выявлен более высокий уровень гемоглобина. Так превосходство данного кросса по этому показателю составило 1,45 г/л (15,3 %) в 17-и недельном возрасте и 0,95 г/л (9,7 %) в 48-и недельном возрасте по сравнению с курами

кросса «Родонит». Статистически значимая разница ($P<0,001$) подчеркивает превосходство кросса «Бованс белый» в этом параметре. Увеличение общего белка у кур с более высокой яйценоскостью указывает на более интенсивный обмен веществ в их организме. Показатель общего белка у исследуемых особей в 17 недель составил 56,68 г/л, а в 48 недель – 57,38 г/л. Такие значения превышали показатели кросса «Родонит» на величину, составляющую почти 10 % в молодом возрасте и около 7 % - в более зрелом.

Обсуждение

Сравнительный анализ двух кроссов кур, «Родонит» и «Бованс белый» выявил существенные различия в структуре расхода обменной энергии, обусловленные генетическими особенностями кроссов.

Кросс «Родонит» демонстрирует более интенсивный рост (на 19,4 % больше живой массы и на 41,5 % больше поверхности тела), но при этом уступает кроссу «Бованс белый» в продуктивности (на 11 % или 4 г/сутки) и эффективности использования обменной энергии (на 9,7 %). Эти расхождения обусловлены особенностями физиологических процессов, влияющих на расход энергии.

Так, среднесуточный расход обменной энергии на килограмм живой массы у кросса «Родонит» составляет 639,5 кДж, в то время как у «Бованс белый» этот показатель выше на 9,7 % и достигает 701,4 кДж. Кроме того, куры «Бованс белый» более эффективно направляют энергию на производство яиц, используя для этого в среднем 267,2 кДж (24,7 % от общей обменной энергии), тогда как «Родонит» расходует на эти цели меньшую долю – 241,4 кДж (20,5 %).

Затраты на изотермию организма на кг живой массы у кур кросса «Бованс белый» выше по сравнению с кроссом «Родонит» на 3,6 %.

Выявлена положительная корреляция между базовым метаболизмом и энергетическими затратами на формирование яйца. У кросса «Бованс белый» эта связь была сильной ($r = 0,892$, $R_1 = 1,20$, $r^2 = 0,798$), в то время как у кросса «Родонит» она оказалась значительно слабее ($r = 0,630$, $R_1 = 1,60$, $r^2 = 0,408$).

Высокая термочувствительность процесса откладывания яиц объясняет обратную связь между уровнем теплообеспеченности и яйценоскости кур.

Исследования показали, что высокая продуктивность кур кросса «Бованс белый» обусловлена их эффективным использованием обменной энергии и повышенной интенсивностью метаболических процессов.

Заключение

Использование кур кросса «Бованс белый» для получения яиц способствует повышению экономической эффективности. Отмечается снижение суточных затрат валовой энергии корма на 131 кДж (8,7 %) и одновременное увеличение яйцепродуктивности на 25,8 кДж (10,7 %) в сравнении с кроссом «Родонит».

Методика оценки пород и кроссов, технологии кормления и периодов яйценоскости по динамике

расхода обменной энергии рекомендуется для применения.

Литература

1. Леконцева Н.А., Астраханцев А.А., Воробьева С.Л. Сравнительная характеристика продуктивных качеств кур-несушек кроссов Ломанн // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 4(84). С. 312-315.

2. Садомов Н.А., Шамсуддин Л.А., Измайлович И.Б. Продуктивные качества кур яичных кроссов Тетра и Хайсекс браун в условиях промышленной технологии // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2023. №26-2. С.31-38.

3. Астраханцев А. А., Леконцева Н.А., Наумова В.В. Яичная продуктивность кур-несушек различных кроссов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 2(50). С. 206-210. doi 10.18286/1816-4501-2020-2-206-211.

4. Расторгуева Н.В., Гибалкина Н.И., Мунгин В.В. Яичная продуктивность кур-несушек различных кроссов // Вестник Нижегородского государственного агротехнологического университета. 2024. № 3(43). С. 72-77.

5. Косарев К. В., Астраханцев А. А. Характеристика некоторых показателей обмена веществ в организме кур при включении в рационы глюконата кальция, «кальций макг» и «протикал три плюс» // Ученые записки КГАВМ им. Н.Э. Баумана. 2018. №1. 65-69.

6. Наумова В. В. Лекомцева А. Д. Структура расхода обменной энергии и скорость роста цыплят-бройлеров кроссов «Кобб 500» и «Арбор Айкрез» // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 4(36). С. 140-143.

7. Наумова В. В. Структура расхода обменной энергии и влияние основного обмена на яичную продуктивность кур разных кроссов / В. В. Наумова // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : материалы VIII международной научно-практической конференции, Ульяновск, 07–08 февраля 2017 года. Том 2017-Часть III. – Ульяновск: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина, 2017. С. 84-89.

8. Мохов Б. П., Наумова В.В. Энергоэффективность использования обменной энергии у кур и крупного рогатого скота разной наследственности / Б. П. Мохов, В. В. Наумова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4(64). С. 129-135. doi 10.18286/1816-4501-2023-4-129-135

9. Анаников Я. Г. Результаты влияния генетики на рост, развитие и яичную продуктивность кур-несушек // Ученые записки КГАВМ им. Н.Э. Баумана. 2024. №4. С.34-40. doi:10.31588/2413_4201_1883_4_260_34.

10. Анаников Я.Г., Батанов С.Д., Атнабаева Н.А. Яичная продуктивность кур-несушек кроссов ломанн браун-классик, браун ник, корал, супер ник // Вестник Марийского государственного университета. Серия

«Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2024. №4. С. 325-333. doi:10.30914/2411-9687-2024-10-4-325-333

11. Кормление сельскохозяйственной птицы / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.М. Околелова и др. Сергиев Посад, ВНИТИП. 2008. 375 с.

12. Энгиноева Т.Х., Омаров Р.Ш. Влияние комплекса биологически активных веществ на обмен веществ, иммунный статус и продуктивность кур - несушек и цыплят // Известия Горского государственного аграрного университета. 2010. Т. 47. № 1. С. 146-148.

13. Середа Т.И. Характеристика углеводного обмена в организме кур-несушек кросса «Ломанн белый» / Т.И. Середа, М.А. Дерхо // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. №31-1. С. 334-337.

14. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А. П. Калашников, В. И. Фисинин, В. В. Щеголев и др. Москва: Знание, 2005. 456 с.

15. Влияние новых видов кормов из местных растительных ресурсов на иммунный статус, зоотехнические и гематологические показатели кур-несушек / И. Ф. Горлов, Н. В. Калинина, М. И. Сложенкина и др. // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 1. С. 203-214. doi 10.33284/2658-3135-106-1-203

References

1. Lekontseva N.A., Astrakhantsev A.A., Vorobyeva S.L. Comparative characteristics of the productive qualities of laying hens of the Lohmann cross // Bulletin of the Orenburg State Agrarian University. 2020. No. 4 (84). P. 312-315.

2. Sadowov N.A., Shamsuddin L.A., Izmailovich I.B. Productive qualities of Tetra and Hisex Brown egg-laying hens under industrial technology conditions // Actual problems of intensive development of animal husbandry. 2023. No. 26-2. P. 31-38.

3. Astrakhantsev A.A., Lekontseva N.A., Naumova V.V. Egg productivity of laying hens of various crosses // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2020. No. 2 (50). P. 206-210. doi 10.18286/1816-4501-2020-2-206-211.

4. Rastorgueva N.V., Gibalkina N.I., Mungin V.V. Egg productivity of laying hens of various crosses // Bulletin of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. 2024. No. 3 (43). P. 72-77.

5. Kosarev K.V., Astrakhancev A.A. Characteristics of some metabolic indicators in the body of chickens when including calcium gluconate, "calcium makg" and "protical three plus" in the diets // Scientific Notes of the KGAVM im. N.E. Bauman. 2018. No. 1. 65-69.

6. Naumova V. V., Lekontseva A. D. The structure of metabolic energy consumption and the growth rate of broiler chickens of the Cobb 500 and Arbor Acres crosses // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2016. No. 4 (36). P. 140-143.

7. Naumova V. V. The structure of metabolic energy consumption and the influence of basal metabolism on egg productivity of chickens of different crosses / V. V.

Naumova // Agricultural science and education at the present stage of development: experience, problems and ways of their solution: materials of the VIII international scientific and practical conference, Ulyanovsk, February 7-8, 2017. Volume 2017-Part III. - Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin, 2017. P. 84-89.

8. Mokhov B. P., Naumova V. V. Energy efficiency of using metabolic energy in chickens and cattle of different heredity / B. P. Mokhov, V. V. Naumova // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2023. No. 4 (64). P. 129-135. doi 10.18286/1816-4501-2023-4-129-135

9. Ananikov Ya. G. Results of the influence of genetics on the growth, development and egg productivity of laying hens // Scientific notes of the KGAVM im. N.E. Bauman. 2024. No. 4. P. 34-40. doi: 10.31588/2413_4201_1883_4_260_34.

10. Ananikov Ya.G., Batanov S.D., Atnabaeva N.A. Egg productivity of laying hens of crosses Lohmann Brown-Classic, Brown Nick, Coral, Super Nick // Bulletin of the Mari State University. Series "Agricultural Sciences. Economic Sciences". 2024. No. 4. P. 325-333. doi:10.30914/2411-9687-2024-10-4-325-333

11. Feeding poultry / V.I. Fisinin, I.A. Egorov, T.M. Okolelova and others. Sergiev Posad, VNITIP. 2008. 375 p.

12. Enginoeva T.Kh., Omarov R.Sh. The influence of a complex of biologically active substances on the metabolism, immune status and productivity of laying hens and chickens // Bulletin of the Gorsk State Agrarian University. 2010. Vol. 47. No. 1. P. 146-148.

13. Sereda T.I. Characteristics of carbohydrate metabolism in the body of laying hens of the "Lohmann White" cross / T.I. Sereda, M.A. Derkho // Bulletin of the Orenburg State Agrarian University. 2011. No. 31-1. P. 334-337.

14. Norms and rations for feeding farm animals / A.P. Kalashnikov, V.I. Fisinin, V.V. Shchegolev, et al. Moscow: Znanie, 2005. 456 p.

15. The influence of new types of feed from local plant resources on the immune status, zootechnical and hematological parameters of laying hens / I. F. Gorlov, N. V. Kalinina, M. I. Slozhenkina, et al. // Animal husbandry and forage production. 2023. Vol. 106. No. 1. P. 203-214. doi 10.33284/2658-3135-106-1-203

Влияние кориандра посевного и фенхеля обыкновенного на экспрессию генов, ассоциированных с иммунной системой у быков на откорме

К. С. Остренко^{1✉}, доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией,

А. Н. Овчарова¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал «Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»

Н. В. Невкрытая², кандидат биологических наук, заведующая отделом

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма

Р. В. Некрасов¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, директор

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал «Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»

249013, Калужская область, г. Боровск

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма.

295043, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, д.150

✉ ostrenkoks@gmail.com

Резюме. В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на оценку влияния фитобиотических кормовых добавок на основе плодов *Foeniculum vulgare* (фенхель обыкновенный) и *Coriandrum sativum* L. (кориандр посевной) на продуктивные показатели и молекулярно-генетические маркеры иммунного статуса у бычков в период откорма. Актуальность работы обусловлена поиском эффективных альтернатив кормовым антибиотикам, направленным на модуляцию иммунологической реактивности и повышение естественной резистентности сельскохозяйственных животных без ущерба для продуктивности. Эксперимент проведен на 40 теллятах чёрно-пёстрой породы в период откорма с 7...12 месячного возраста, разделённых на 4 группы по 10 голов в каждой. Животным опытных групп в основной рацион дополнительно вводили смесь плодов кориандра посевного и фенхеля обыкновенного в различных пропорциях (70/30, 50/50, 30/70), что соответствует 1 мл смеси эфирных масле. В ходе научного эксперимента методом ПЦР в реальном времени проведен количественный анализ экспрессии ключевых генов, ассоциированных с воспалительным ответом и клеточным гомеостазом, в мононуклеарных клетках периферической крови. Применение фитокомплекса статистически значимо ингибировало транскрипционную активность генов провоспалительных цитокинов — интерлейкина-6 (IL-6) и интерлейкина-8 (IL-8), что свидетельствует о супрессии системного воспалительного фона. Одновременно с этим зафиксировано усиление экспрессии генов SIRT1 и SIRT3, кодирующих NAD⁺-зависимые деацетилазы сиртуины, играющие ключевую роль в регуляции клеточного антиоксидантного ответа, метаболизма и апоптоза. Полученные молекулярно-биологические данные свидетельствуют о многокомпонентном потенциале исследуемых фитогеников, реализующемся через противовоспалительный, иммуномодулирующий и антиоксидантный механизмы действия. Выявленные эффекты коррелировали с улучшением зоотехнических показателей, так валовый прирост в 3 опытной группе был выше на 48 % ($p < 0,05$), среднесуточный прирост был выше в опытных группах на 11...50 % ($p < 0,05$).

Ключевые слова: фитогеники, интерлейкины, сиртуины, бычки, фитобиотики, фенхель обыкновенный, кориандр посевной.

Для цитирования: Влияние кориандра посевного и фенхеля обыкновенного на экспрессию генов, ассоциированных с иммунной системой у быков на откорме / К. С. Остренко, А. Н. Овчарова, Н. В. Невкрытая, Р. В. Некрасов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 135-141. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-135-141

Effects of coriander and fennel on the expression of genes associated with the immune system in fattening bulls

Ostrenko K.S.¹, Ovcharova A. N.¹, N.V. Nevkrytaya², Nekrasov R. V.²

¹All-Russian Scientific Research Institute of Physiology, Biochemistry and Nutrition of Animals is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center of Animal Husbandry named after Academician L.K. Ernst

295043, Republic of Crimea, Simferopol, Kyiv St., 150

²249013, Kaluga region, Borovsk

Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study aimed at evaluating the effects of phytobiotic feed additives based on the fruits of *Foeniculum vulgare* (fennel) and *Coriandrum sativum* L. (coriander) on productive performance and molecular-genetic markers of immune status in fattening bulls. The relevance of the work stems from the

search for effective alternatives to feed antibiotics, intended to modulate immunological reactivity and enhance natural resistance in farm animals without compromising productivity. The experiment was conducted on 40 Black-and-White breed calves during the fattening period from 7 to 12 months of age, divided into 4 groups of 10 animals each. Animals in the experimental groups were additionally fed a mixture of coriander and fennel fruits in various proportions (70/30, 50/50, 30/70) incorporated into the basal diet, corresponding to 1 mL of a mixture of essential oils. During the experiment, quantitative analysis of the expression of key genes associated with the inflammatory response and cellular homeostasis was performed in peripheral blood mononuclear cells using real-time PCR. It was established that the application of the phyto-complex statistically significantly inhibited the transcriptional activity of pro-inflammatory cytokine genes — interleukin-6 (IL-6) and interleukin-8 (IL-8) — indicating suppression of the systemic inflammatory background. Concurrently, enhanced expression of the SIRT1 and SIRT3 genes was recorded, which encode NAD⁺-dependent deacetylases (sirtuins) playing a crucial role in the regulation of cellular antioxidant response, metabolism, and apoptosis. The obtained molecular-biological data indicate the multicomponent potential of the studied phyto-genics, realized through anti-inflammatory, immunomodulatory, and antioxidant mechanisms of action. The observed effects correlated with improved zootechnical performance indicators: the total weight gain in the third experimental group was 48% higher ($p < 0.05$), and the average daily gain in the experimental groups was 11–50% higher ($p < 0.05$).

Keywords: phyto-genics, interleukins, sirtuins, gobies, phytobiotics, fennel, coriander seeds.

For citation: Effects of coriander and fennel on the expression of genes associated with the immune system in fattening bulls / K. S. Ostrenko, A. N. Ovcharova, N. V. Nevkrytaya, R. V. Nekrasov // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 135-141 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-135-141

Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант № 23-16-00052)

Введение

Нерациональное применение кормовых антибиотиков в современном животноводстве привело к формированию серьезной угрозы в виде повышенной антибиотикорезистентности патогенных микроорганизмов. Данные Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека указывают на тревожную тенденцию роста числа штаммов бактерий, устойчивых к антибактериальным средствам, в продуктах питания животного происхождения. Так, за период с 2018 по 2020 гг. наибольшая частота выделения резистентных микроорганизмов была зафиксирована именно в мясе птицы и соответствующих изделиях, составляя около половины всех случаев (50,0 %). Следующими по распространённости оказались готовые блюда и мясные изделия, в которых были обнаружены примерно четверть (26,2 %) и почти пятая часть (18,6 %) резистентных микробов соответственно.

Среди выявленных патогенов лидирующее положение занимают сальмонеллы, составляющие основную долю устойчивых организмов (62,5 %). Золотистые стафилококки составляют вторую по численности группу резистентных возбудителей (29,8 %), тогда как листерии находятся на третьем месте с долей 7,7 %. Такая ситуация вызывает беспокойство у специалистов здравоохранения и ветеринарии ввиду риска передачи резистентных бактерий человеку через пищевые цепи, что потенциально увеличивает вероятность возникновения трудно излечимых инфекций и осложнений у населения [1].

Актуальность поиска альтернативных средств стимуляции роста и поддержания здоровья сельскохозяйственных животных обусловлена глобальными вызовами, связанными с ограничением применения кормовых антибиотиков. Одним из высокоперспективных направлений выступает использование фитогеников - комплексов биологически активных

соединений (фенолов, терпенов, флавоноидов, алкалоидов), получаемых из экстрактов или цельных частей лекарственных растений и обладающих полимодальным механизмом действия [2, 3].

Особую значимость это приобретает в отношении молодняка крупного рогатого скота, иммунная система которого в критические периоды онтогенеза (отъем, транспортировка, смена типа кормления, формирование гетерогенных групп) подвергается значительным антигенным и метаболическим нагрузкам. Воздействие указанных стресс-факторов приводит к супрессии факторов резистентности, что потенцирует повышенную заболеваемость респираторными и желудочно-кишечными патологиями и, как следствие, снижению продуктивных кондиций. [2, 4]. Иммунный статус молодняка крупного рогатого скота в критические периоды постнатального онтогенеза подвержен существенной нагрузке, индуцированной комплексом технологических стресс-факторов, включая отъем, транспортировку, трансформацию рациона и формирование гетерогенных групп содержания. Воздействие данных факторов потенцирует состояние транзитного иммунодефицита, следствием чего является повышение чувствительности к патогенам респираторного и желудочно-кишечного трактов с последующим снижением продуктивных показателей.

Фундаментальную роль в инициации и регуляции реакций иммунитета играют провоспалительные цитокины, среди которых ключевыми медиаторами выступают интерлейкин-6 (IL-6) и интерлейкин-8 (IL-8, хемокин CXCL8). IL-6, являясь плейотропным цитокином, осуществляет регуляцию синтеза белков острой фазы воспаления, процессов дифференцировки лимфоцитов и миелопоэза. IL-8 выступает хемоаттрактантом для нейтрофилов, обеспечивая их быструю мобилизацию к очагу инфекции [5]. Адекватная экспрессия этих генов критически важна для эффективного

запуска и регуляции иммунной защиты. Другим важным аспектом поддержания клеточного гомеостаза в условиях стресса является работа митохондрий и окислительный статус. Семейство сиртуинов (NAD⁺-зависимых деацетилаз) играет центральную роль в регуляции клеточного метаболизма, стрессоустойчивости и воспаления. Сиртуин-1 (SIRT1) – ядерный и цитоплазматический белок, регулирующий активность ключевых транскрипционных факторов (например, NF-κB), тем самым модулируя воспалительный ответ и апоптоз [6]. Сиртуин-3 (SIRT3) – основной митохондриальный белок, обеспечивающий антиоксидантную защиту, β-окисление жирных кислот и цикл трикарбоновых кислот, обеспечивая энергетический баланс и нейтрализацию активных форм кислорода [7]. Таким образом, активация сиртуинов повышает резистентность организма к окислительному стрессу и воспалению.

Эфиروносы демонстрируют широкий спектр биологических свойств, включая антиоксидантную активность, противомикробное действие и способность стимулировать пищеварительные процессы. Содержащиеся в них эфирные масла оказывают комплексное влияние на организм: регулируют аппетит, усиливают секреторную функцию желудочно-кишечного тракта, модулируют состав кишечной микрофлоры и стимулируют секрецию панкреатических ферментов. Это, в свою очередь, повышает активность эндогенных ферментов и способствует активации иммунной системы [8]. Фенхель обыкновенный (*Foeniculum vulgare*), относящийся к семейству Зонтичные, характеризуется высоким содержанием биоактивных компонентов в составе эфирного масла: анетол, лимонен, α-пинен, линалоол, камфоры и γ-терпинен. Многочисленные исследования подтверждают его антиоксидантные, противовоспалительные и противомикробные свойства [9]. Важным аспектом физиологического действия фенхеля является его способность снижать ацетилхолин- и гистамин-индуцированные сокращения желудочно-кишечного тракта, уменьшать газообразование и регулировать моторику гладкой мускулатуры кишечника [3, 5]. Кориандр посевной (*Coriandrum sativum* L., семейство Сельдерейные) содержит эфирное масло, доминирующим компонентом которого является анетол (до 70 %). В его состав также входят анисовый альдегид, α-пинен, лимонен, метилхавикол, фенхон и камфора [9]. Биологическая активность кориандра многогранна и включает антиоксидантное, противовоспалительное, противомикробное, антимутагенное и седативное действия. Особый интерес представляет его способность стимулировать пищеварительную систему, благоприятно влиять на липидный обмен, а также потенциал использования в качестве стимулятора роста и средства для улучшения здоровья кишечника [9, 10]. Изучение экспрессии генов IL6, IL8, SIRT1 и SIRT3 при введении в рацион телят плодов кориандра и фенхеля представляет значительный научный и практический интерес, поскольку

позволит дать комплексную оценку как клеточного, так и гуморального иммунитета. Полученные данные могут стать основой для разработки эффективных стратегий повышения продуктивности молодняка крупного рогатого скота через оптимизацию физиологического статуса и иммунной реактивности.

Цель исследования – оценка влияния кормовых добавок на основе технически обработанных плодов фенхеля и кориандра на рост, продуктивность и экспрессию генов IL-6, IL-8, SIRT1 и SIRT3 у бычков на откорме.

Материалы и методы

Эксперимент был проведен на базе вивария ВНИИФБиП – филиал ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста на телятах с 7-ми до 12- месячного возраста чернопестрой породы голштинизированных. Содержание – стойловое, кормление осуществляли по нормам ВИЖ [11], поение проводили из автоматических поилок. Телята были разделены на 4 группы – одна контрольная и три опытных, по 10 голов в каждой. Фенхель и кориандр вводили в виде смеси обрубленных плодов в дозе порядка 35...40 г на голову с учетом содержания в плодах эфирного масла в различных пропорциях (табл. 1).

Таблица 1. Схема эксперимента

Группа	Схема кормления
1	Основной рацион (ОР)
2	ОР+ 20 г плодов фенхеля обыкновенного и 13,6 г плодов кориандра посевного (что соответствует 1 мл смеси ЭМ фенхеля обыкновенного и кориандра посевного и в пропорции 70/30)
3	ОР+ 14,5 г плодов фенхеля обыкновенного и 23 г плодов кориандра посевного (что соответствует 1 мл смеси ЭМ кориандра посевного и фенхеля обыкновенного в пропорции 50/50)
4	ОР+ 12 г плодов фенхеля обыкновенного и 28 г плодов кориандра посевного (что соответствует 1 мл смеси ЭМ фенхеля обыкновенного и кориандра посевного в пропорции 30/70)

Для анализа уровня экспрессии генов IL-6, IL-8, SIRT1, SIRT3 применили вариант полимеразной цепной реакции, основанный на регистрации продуктов ПЦР в режиме реального времени. Использовали оригинальные праймеры и ДНК-зонды, обеспечивающие специфическую обратную транскрипцию и полимеразную цепную реакцию. Лимфоциты из цельной крови отделяли с помощью набора «ПРОБА-ФИКОЛЛ» («ДНК-Технология», Россия), тотальную РНК из образцов – «РИБО-преп» («AmpliSens», ФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора, Россия). Согласно инструкции очищенные РНК помещали в лабораторный холодильник (от 2 до 8 °С) на 12 ч. Затем при помощи набора «РЕВЕРТА-Л» («AmpliSens», ФБУН ЦНИИ эпидемиологии) осуществили реакцию обратной транскрипции и получили кДНК на матрице РНК. Для оценки профиля экспрессии генов использовали технологию относительного анализа количества мРНК в образцах с помощью реакции обратной транскрипции и последующей ПЦР в реальном времени (ОТ-ПЦР в реальном времени). ОТ-ПЦР

выполняли в трех повторах. Концентрацию полученной кДНК измеряли на приборе MAXLIFE Fluorimeter 2.0 с применением набора «dsDNA 2.0-500 V2.0 MAXLIFE» (ООО «МВМ-Диагностик»). ПЦР проводили в 48-луночной планшете «АНК-М» (Институт аналитического приборостроения РАН, Россия), содержащем помимо анализируемых образцов, пять стандартов с двукратным разведением (необходимых для оценки качества ПЦР) и отрицательный контроль. Каждый образец, стандарт и отрицательный контроль анализировали в трех технических повторах. Реакцию амплификации выполняли с помощью набора «HS-qPCR SYBR Blue 2x» («Биолабмикс», Россия) на анализаторе нуклеиновых кислот согласно протоколу производителя. Режимы амплификации и список праймеров представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Режимы проведения амплификации в реальном времени

Режимы	Температура °C	Продолжительность с	Количество циклов
Натуральная денатурация	95	300	1
Денатурация	95	20	45
Отжиг	55-56	40	45
Элонгация	72	30	45

Таблица 3. Олигонуклеотидные праймеры

Исследуемая мишень	Олигонуклеотидные праймеры
IL-6 F	5'-CTTCTGCTTTCCCTACCCCG-3'
IL-6 R	5'-TTCTGCCAGTGTCTCCTTGC-3'
IL-8 F	5'-CTCTCTGCAGCTCTGTGTGAA-3'
IL-8 R	5'-GGGTTTAGGCAGACCTCGTTT-3'
SIRT3 F	5'-GGUGGAGGAUGGUCCAUAUTT-3'
SIRT3 R	5'-AUAUGGACCAUCCUCCACCTT-3'
SIRT1 F	5'-CAGAGGCCGGTGTCACTCT-3'
SIRT1 R	5'-TCTTCCTCCTCGTCTCGGTG-3'
GAPDH F	5'-CGTAACCTCTGTGCTGTGCCA-3'
GAPDH R	5'-CTTGCCGTGGGTGGAATCAT-3'
Количественную ПЦР в реальном времени проводили на приборе АНК-М с использованием набора для ПЦР «SYBR-Blue».	

Относительную экспрессию рассчитывали по методу 2-Ct [12]. Для корректной оценки уровня экспрессии изучаемых генов важен правильный выбор нормировочных генов, так как они могут по-разному экспрессировать в разных тканях и даже в пределах одной ткани. В качестве референтного значения был выбран ген-нормализатор GAPDH. У крупного рогатого скота его активность постоянна, что позволяет использовать его в качестве стандартного контроля при экспрессии.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали биометрически с использованием метода однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) в программе STATISTICA 10 (StatSoft Inc., США). Вычисляли среднеарифметические значения (M), среднеквадратическую ошибку ($\pm$ SEM) и уровень значимости (p).

Результаты

Полученные экспериментальные данные демонстрируют полимодальное благоприятное воздействие фитобиотических композиций на основе обрубков плодов *Foeniculum vulgare* и *Coriandrum sativum* L. на иммуно-метаболический гомеостаз у телят. Статистически значимая супрессия транскрипционной активности генов провоспалительных цитокинов IL-6 и IL-8 (рис. 1), наиболее репрезентативная в группе с доминированием кориандрового компонента, свидетельствует о купировании системного воспалительного фона у животных опытных групп. Патогенетически IL-6 функционирует как плейотропный медиатор острофазного ответа и стресс-индуцированных реакций, тогда как IL-8 выступает ключевым хемокином нейтрофильного хемотаксиса.

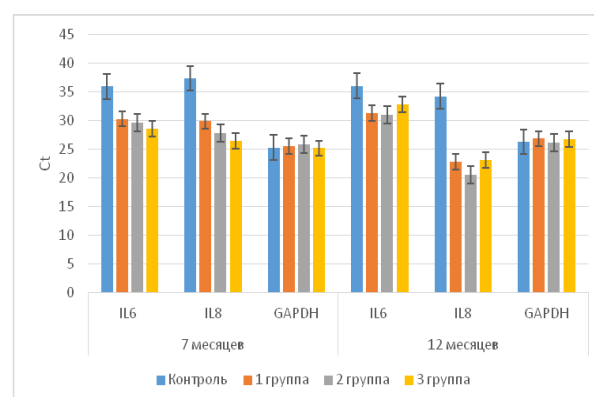


Рис. 1. Экспрессия генов IL6, IL8 у бычков на дорастивании в 7 и 12-месячном возрасте

Детектированная регуляция транскрипционных уровней SIRT1 и SIRT3 (рис. 2), максимально выраженная в группе с кориандровым профилем, обладает существенным физиологическим импактом.

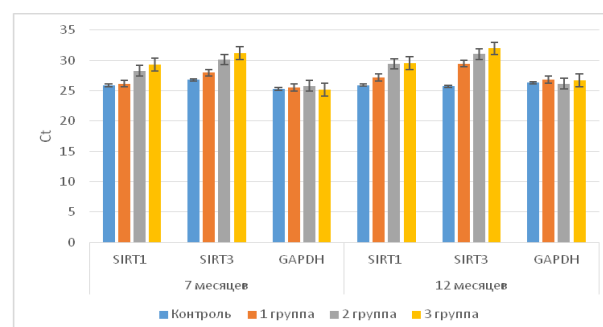


Рис. 2. Экспрессия генов SIRT1, SIRT3 у бычков на дорастивании в 7 и 12-месячном возрасте

Активация сиртуинов 1 и 3 указывает на улучшение метаболического статуса и повышение стрессоустойчивости животных, что может быть связано со способностью биоактивных компонентов изучаемых фитогеников модулировать NAD⁺-зависимые сигнальные пути [13]. Обнаруженные изменения в экспрессии изучаемых генов нашли отражение в улучшении продуктивных показателей (табл. 4).

В ходе проведенного исследования живая масса телят во всех группах, получавших фитогенные добавки, сохраняла тенденцию к повышению. В группе II данный показатель был выше

соответствующих показателей в контрольной группе на 12,6 % ($P<0,05$). Максимальная живая масса зафиксирована в группе III, где валовой привес превышал контрольные значения на 18,1 % ($P<0,05$).

Таблица 4. Зоотехнические показатели молодняка бычков в 7 и 12- месячном возрасте ($M\pm SEM$)

Показатель	Группа			
	контрольная	I	II	III
Средняя живая масса телят в 7 месяцев, кг	160,5 $\pm$ 19,6	186,1 $\pm$ 18,4	206,0 $\pm$ 22,3*	217,6 $\pm$ 21,4*
Валовый прирост, кг	33 $\pm$ 2,9	41,1 $\pm$ 5,2	54,3 $\pm$ 4,3*	60,4 $\pm$ 6,1*
% к контролю по приросту живой массы	100	116	128,4	135,6
Среднесуточный прирост за период, кг	0,55 $\pm$ 0,13	0,69 $\pm$ 0,23	0,91 $\pm$ 0,14*	1,00 $\pm$ 0,21*
Средняя живая масса телят в 12 месяцев, кг	336,7 $\pm$ 10,7	349,3 $\pm$ 12,9	379,2 $\pm$ 20,1*	397,6 $\pm$ 18,9*
Валовый прирост, кг	121,5 $\pm$ 17,3	135,3 $\pm$ 24,1	159,2 $\pm$ 20,1	180,0 $\pm$ 19,1*
% к контролю по приросту живой массы	100	111,4	131,1	148,1
Среднесуточный прирост за период, кг	0,81 $\pm$ 0,21	0,902 $\pm$ 0,23	1,06 $\pm$ 0,16*	1,20 $\pm$ 0,14*

*достоверная разница * $P<0,05$ к контролю

За весь период исследования (7...12 месяцев) среднесуточный прирост также был максимальным в группе III, составив 1,20 кг/сут, что на 48,1 % превышает показатель контроля ($P<0,05$).

Включение в рацион бычков смеси плодов фенхеля и кориандра, особенно в пропорции 30/70 (группа III) способствует достоверному повышению интенсивности роста, что выражается в увеличении живой массы, валовых и среднесуточных приростов на 11...48 % в зависимости от периода и группы. Полученные данные подтверждают целесообразность использования исследуемых фитогенов в качестве кормовых добавок, обладающих ростостимулирующим эффектом.

Обсуждение

Выявленная редукция их экспрессии свидетельствует о модуляции иммунного ответа в сторону противовоспалительного фенотипа, что коррелирует с литературными данными о противовоспалительном потенциале фенольных и терпеноидных фракций изучаемых растений [3, 14].

Особую значимость имеет установленная обратная корреляционная зависимость между экспрессией сиртуинов. Ядерный сиртуин SIRT1 выступает ключевым эпигенетическим регулятором метаболических путей и редукции оксидативного стресса в то время, как митохондриальный SIRT3 модулирует энергетический метаболизм и активирует системы антиоксидантной защиты [3], что в совокупности объясняет наблюдаемый иммунометаболический эффект. Полученные результаты свидетельствуют о комплексном положительном действии фитогеников на основе обрубков плодов фенхеля обыкновенного и кориандра посевного на иммунный и метаболический статус телят. Выявленное достоверное снижение экспрессии провоспалительных цитокинов IL6 и IL8 (табл. 2), особенно выраженное в группе с преобладанием плодов кориандра в смеси свидетельствует о снижении уровня системного воспаления у

животных опытных групп. Как было указано выше, повышенная экспрессия IL-6 ассоциирована с активными воспалительными процессами и стрессовой нагрузкой в то время, как IL-8 является ключевым хемоаттрактантом, мобилизующим нейтрофилы в очаг воспаления [2, 8]. Подавление экспрессии этих генов может указывать на более сбалансированное состояние иммунной системы, что согласуется с данными других исследований о противовоспалительных свойствах биоактивных компонентов фенхеля и кориандра [3, 14]. Особый интерес представляет выявленная обратная корреляция между экспрессией провоспалительных цитокинов и сиртуинов. Наблюдаемое увеличение экспрессии SIRT1 и SIRT3 в опытных группах (табл. 2), также наиболее выраженное в группе бычков, получавших смесь плодов с преобладанием кориандра, имеет важное физиологическое значение, так как SIRT1 играет ключевую роль в регуляции клеточного метаболизма и подавлении окислительного стресса, а митохондриальный SIRT3 является важным регулятором энергетического обмена и антиоксидантной защиты [13].

Введение в рацион плодов фенхеля и кориандра сказывается в том числе и на составе кишечной и рубцовой флоры, что на фоне снижения провоспалительных интерлейкинов IL-6 и IL-8, по всей видимости, способствует лучшему усвоению питательных веществ и перераспределению их с иммунных функций на рост и развитие в то время, как активация сиртуиновых путей (SIRT1, SIRT3) поддерживает метаболическое здоровье и снижает оксидативный стресс [14], создавая оптимальные условия для реализации генетического потенциала продуктивности. Наибольшая эффективность смеси плодов с преобладанием кориандра (70%) может быть связана с особенностями его химического состава, в частности с высоким содержанием анетолы и других биоактивных соединений, проявляющих синергический эффект [15, 16].

Коррекция рациона благодаря введению плодов фенхеля и кориандра индуцирует модуляцию генов, ассоциированных с основными факторами неспецифической резистентности, что в комплексе со снижением уровня провоспалительных цитокинов (IL-6, IL-8) способствует оптимизации процессов усвоения нутриентов и их реаллокации с иммунных функций на процессы роста и развития. Параллельная активация сиртуин-опосредованных сигнальных путей (SIRT1, SIRT3) обеспечивает поддержание метаболического гомеостаза и снижение оксидативного стресса [6], формируя благоприятный физиологический фон для реализации генетически детерминированного продуктивного потенциала. Наибольшая эффективность композиции с доминированием кориандра (70%) коррелирует с особенностями его фитохимического профиля, в частности – с высоким содержанием анетол и других биологически активных соединений, проявляющих синергический эффект.

Заключение

Включение в рацион бычков на откорме фитогенов на основе плодов фенхеля обыкновенного и кориандра посевного в рацион телят оказывает комплексное положительное влияние на организм, модулируя экспрессию генов иммунной защиты (IL-6, IL-8) и клеточного метаболизма (SIRT1, SIRT3). Наибольшая эффективность выявлена при использовании композиции с преобладанием кориандра посевного (70 %). Полученные результаты имеют практическое значение для разработки современных схем кормления с использованием фитогенных добавок.

Литература

1. Badgujar S. B., Patel V. V., Bandivdekar A. H. *Foeniculum vulgare* mill: A review of its botany, phytochemistry, pharmacology, contemporary application, and toxicology // *BioMed Research International*. 2014. P. 842674. doi: 10.1155/2014/842674
2. Мирошников П. Н., Жучаев К. В. Применение эфирных масел в животноводстве как альтернатива кормовым антибиотикам // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2020. № 4. С. 59-64. doi: 10.31677/2072-6724-2020-30-4-59-64
3. Effects of supplementing broiler diets with coriander seed powder on growth performance, blood haematology, ileum microflora and economic efficiency / A. E. Taha, S. S. Hassan, R. S. Shewita, et al. // *Journal of animal physiology and animal nutrition*. 2019. No. 103 (5). P. 1474-1483. doi: 10.1111/jpn.13165
4. SIRT3 deficiency and mitochondrial protein hyperacetylation accelerate the development of the metabolic syndrome / M. D. Hirschey, T. Shimazu, E. Jing, et al. // *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 2011. Vol. 76. P. 81-90. doi: 10.1016/j.molcel.2011.07.019
5. Khubeiz M.M., Shirif A. M. Effect of coriander (*Coriandrum sativum* L.) seed powder as feed additives on performance and some blood parameters of broiler chickens // *Open Veterinary Journal*. 2020. No. 10. P. 198-205. doi: 10.4314/ovj.v10i2.9
6. Small molecule activators of sirtuins extend *Saccharomyces cerevisiae* lifespan / K.T. Howitz, K. J. Bitterman, H.Y. Cohen, et al. // *Nature* 2003. Vol. 425. P. 191-196. doi: 10.1038/nature01960
7. Use of phytogetic products as feed additives for swine and poultry / W. Windisch, K. Schedle, C. Plitzner, et al. // *Journal of Animal Science*. 2008. Vol. 86. P. 140-148. doi: 10.2527/jas.2007-0459
8. Анализ плодов кориандра посевного и фенхеля обыкновенного как источника фитогеников для молодняка крупного рогатого скота / Н. В. Невкрытая, Е.Н. Грунина, О.Б. Скипо и др. // *Таврический вестник аграрной науки*. 2023. Т. 3. № 3. С. 158-169.
9. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) and its bioactive constituents / B. Laribi, K. Kouki, M. M'Hamdi, et al. // *Fitoterapia*. 2015. Vol. 103. P. 9-26. doi: 10.1016/j.fitote.2015.03.012
10. Tanaka T., Narazaki M., Kishimoto T. IL-6 in Inflammation, Immunity, and Disease // *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 2014. Vol. 6(10). P. a016295. doi: 10.1101/cshperspect. a016295
11. Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах / Р. В. Некрасов, А. В. Головин, Е. А. Махаев, и др. Москва, ФГБНУ «ВИЖ им. Л.К. Эрнста» 2018. 290 с.
12. Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} Method // *Methods*. 2001. Vol. 25(4). P. 402-408
13. Kauppinen A. Antagonistic crosstalk between NF-κB and SIRT1 in the regulation of inflammation and metabolic disorders / A. Kauppinen, T. Suuronen, J. Ojala, et al. // *Cell Signal*. 2013. P. No.10. P. 1939-1948. doi: 10.1016/j.cellsig.2013.06.007
14. *Foeniculum vulgare*: A comprehensive review of its traditional use, phytochemistry, pharmacology, and safety / M.A. Rather, B.A. Dar, S.N. Sofi, et al. // *Arabian Journal of Chemistry*. 2016. Vol. 9. P. S1574-S1583. doi: 10.1016/j.arabjc.2012.04.011
15. Bickel M. The role of interleukin-8 in inflammation and mechanisms of regulation // *Journal of Periodontology*. 1993. Vol. 64. P. 456-460.
16. Bernabucci U. Influence of body condition score on relationships between metabolic status and oxidative stress in periparturient dairy cows / U. Bernabucci, B. Ronchi, N. Lacetera, et al. // *J Dairy Sci*. 2005. No. 6. P. 2017-26. doi: 10.3168/jds. S0022-0302(05)72878-2

References

1. Badgujar S. B., Patel V. V., Bandivdekar A. H. *Foeniculum vulgare* mill: A review of its botany, phytochemistry, pharmacology, contemporary application, and toxicology // *BioMed Research International*. 2014. P. 842674. doi: 10.1155/2014/842674
2. Miroshnikov P. N., Zhuchaev K. V. Use of essential oils in animal husbandry as an alternative to feed antibiotics // *Innovations and Food Security*. 2020. No. 4. P. 59-64. doi: 10.31677/2072-6724-2020-30-4-59-64

3. Effects of supplementing broiler diets with coriander seed powder on growth performance, blood haematology, ileum microflora and economic efficiency / A. E. Taha, S. S. Hassan, R. S. Shewita, et al. // *Journal of animal physiology and animal nutrition*. 2019. No. 103(5). P. 1474-1483. doi: 10.1111/jpn.13165
4. SIRT3 deficiency and mitochondrial protein hyperacetylation accelerate the development of the metabolic syndrome / M. D. Hirschey, T. Shimazu, E. Jing, et al. // *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 2011. Vol. 76. P. 81-90. doi: 10.1016/j.molcel.2011.07.019
5. Khubeiz M.M., Shirif A.M. Effect of coriander (*Coriandrum sativum* L.) seed powder as feed additives on performance and some blood parameters of broiler chickens // *Open Veterinary Journal*. 2020. No. 10. P. 198-205. doi: 10.4314/ovj.v10i2.9
6. Small molecule activators of sirtuins extend *Saccharomyces cerevisiae* lifespan / K.T. Howitz, K. J. Bitterman, H.Y. Cohen, et al. // *Nature* 2003. Vol. 425. P. 191-196. doi: 10.1038/nature01960
7. Use of phytogetic products as feed additives for swine and poultry / W. Windisch, K. Schedle, C. Plitzner, et al. // *Journal of Animal Science*. 2008. Vol. 86. P. 140-148. doi: 10.2527/jas.2007-0459
8. Analysis of coriander and fennel fruits as a source of phytogetics for young cattle / N. V. Nevkryatyya, E. N. Grunina, O. B. Skipo, et al. // *Tavrishesky Vestnik Agrarnoy Nauki*. 2023. Vol. 3. No. 3. P. 158-169.
9. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) and its bioactive constituents / B. Laribi, K. Kouki, M. M'Hamdi, et al. // *Fitoterapia*. 2015. Vol. 103. P. 9-26. doi: 10.1016/j.fitote.2015.03.012
10. Tanaka T., Narazaki M., Kishimoto T. IL-6 in Inflammation, Immunity, and Disease // *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 2014. Vol. 6(10). P. a016295. doi: 10.1101/cshperspect. a016295
11. Norms of nutritional requirements of dairy cattle and pigs / R. V. Nekrasov, A. V. Golovin, E. A. Makhaev, et al. Moscow, FGBNU "L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Genetics" 2018. 290 p.
12. Livak K. J., Schmittgen T. D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} Method // *Methods*. 2001. Vol. 25(4). P. 402-408
13. Kauppinen A. Antagonistic crosstalk between NF-κB and SIRT1 in the regulation of inflammation and metabolic disorders / A. Kauppinen, T. Suuronen, J. Ojala, et al. // *Cell Signal*. 2013. P. No. 10. P. 1939-1948. doi: 10.1016/j.cellsig.2013.06.007
14. *Foeniculum vulgare*: A comprehensive review of its traditional use, phytochemistry, pharmacology, and safety / M.A. Rather, B.A. Dar, S.N. Sofi, et al. // *Arabian Journal of Chemistry*. 2016. Vol. 9. P. S1574-S1583. doi: 10.1016/j.arabjc.2012.04.011
15. Bickel M. The role of interleukin-8 in inflammation and mechanisms of regulation // *Journal of Periodontology*. 1993. Vol. 64. P. 456-460.
16. Bernabucci U. Influence of body condition score on relationships between metabolic status and oxidative stress in periparturient dairy cows / U. Bernabucci, B. Ronchi, N. Lacetera, et al. // *J Dairy Sci*. 2005. No. 6. P. 2017-26. doi: 10.3168/jds. S0022-0302(05)72878-2

4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-142-150

УДК 636.082.12:636.32/.38.082.13

Полиморфизмы гена *FRY* у маньчских мериносов, ассоциированные с показателем живой массы в 9 месяцев

А. Ю. Криворучко^{1,2✉}, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Геномная селекция и репродуктивная криобиология в животноводстве»

Н. Г. Лиховид^{1,2}, ведущий научный сотрудник базовой кафедры «Генетика и селекция» медико-биологического факультета, профессор кафедры «Ботаника, физиология и биохимия растений» медико-биологического факультета

О. Н. Криворучко¹, аспирант

А. В. Скокова¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Геномная селекция и репродуктивная криобиология в животноводстве»

А. А. Каниболоцкая¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Геномная селекция и репродуктивная криобиология в животноводстве»

¹ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр»

356241, Ставропольский край, г. Михайловск, Шпаковский район, ул. Никонова, 49

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

✉ dorohin.2012@inbox.ru

Резюме. Современная селекция в животноводстве активно использует молекулярно-генетические маркеры для прогнозирования продуктивных качеств. Применение этих методов основано на обнаружении генов и структурных особенностей в них, связанных с необходимыми параметрами продуктивности. Методами полногеномного поиска ассоциаций у овец выявили ген-кандидат мясной продуктивности *FRY* (Microtubule Binding Protein), вовлеченный в различные биологические процессы, связанные с ростом и развитием животных. Изучение строения гена *FRY* по анализу распределения 4806 полиморфизмов у баранчиков породы маньчский меринос показало, что 2105 из них встречаются редко (менее 5 %) и не представляют интереса для использования в селекции. Среди 20 полиморфизмов, показавших наибольшую величину различий по частоте встречаемости между группами животных с большей и меньшей массой тела, наиболее перспективными в плане использования в качестве молекулярных маркеров продуктивности определены шесть полиморфизмов. Четыре из них представлены однонуклеотидными заменами, расположенными на участке ДНК длиной 3000 пар нуклеотидов. Один полиморфизм является инсерцией, а один – делецией. Все полиморфизмы находятся в интронах гена. Разница в живой массе между группами носителей разных генотипов по этим полиморфизмам составляет 14,8 кг (34,9 %), что является существенным показателем для маньчских мериносов. Обнаруженные в составе гена *FRY* полиморфизмы показали достоверную связь с показателями живой массы у овец породы маньчский меринос и могут быть использованы в качестве генетических маркеров при селекции для повышения мясной продуктивности.

Ключевые слова: овцы, *Ovis aries*, генотипирование, однонуклеотидный полиморфизм, ген *FRY*, живая масса.

Для цитирования: Полиморфизмы гена *FRY* у маньчских мериносов, ассоциированные с показателем живой массы в 9 месяцев / А. Ю. Криворучко, Н. Г. Лиховид, О. Н. Криворучко, А. В. Скокова, А. А. Каниболоцкая // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 142-150. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-142-150

Polymorphisms of the *FRY* gene in Manych merino sheep associated with the live weight indicator at 9 months

Krivoruchko A.Yu.^{1,2✉}, Likhovid N.G.^{1,2}, Krivoruchko O.N.¹, Skokova A.V.¹, Kanibolotskaya A.A.¹,

¹Federal State Budgetary Scientific Institution "North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center"

356241, Stavropol Krai, Shpakovsky District, Mikhailovsk, Nikonov St., 49

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University"

355017, Stavropol, Pushkin St. 1

✉ dorohin.2012@inbox.ru

Abstract. Modern selection in animal husbandry actively uses molecular genetic markers to predict productive qualities. The use of these methods is based on the detection of genes and structural features in them associated with the necessary productivity parameters. Genome-wide association studies in sheep have revealed a candidate gene for meat productivity,

FRY (Microtubule Binding Protein), involved in various biological processes associated with animal growth and development. A study of the FRY gene structure by analyzing the distribution of 4,806 polymorphisms in Manych Merino rams showed that 2,105 of them are rare (less than 5%) and are of no interest for use in breeding. Of the 20 polymorphisms that showed the greatest difference in frequency between groups of animals with higher and lower body weights, six polymorphisms were identified as the most promising in terms of use as molecular markers of productivity. Four of them are single-nucleotide substitutions located on a DNA section 3,000 nucleotide pairs long. One polymorphism is an insertion, and one is a deletion. All polymorphisms are located in the introns of the gene. The difference in live weight between the groups of carriers of different genotypes for these polymorphisms is 14.8 kg (34.9%), which is a significant indicator for Manych Merino sheep. Thus, the polymorphisms found in the FRY gene showed a reliable relationship with live weight indicators in Manych Merino sheep and can be used as genetic markers in selection to increase meat productivity.

Keywords: sheep, *Ovis aries*, genotyping, single nucleotide polymorphism, FRY gene, live weight.

For citation: Polymorphisms of the FRY gene in Manych merino sheep associated with the live weight indicator at 9 months / Krivoruchko A. Yu., Likhovid N.G., Krivoruchko O.N., Skokova A.V., Kanibolotskaya A.A. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 142-150 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-142-150

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 25-16-20051 от 17.04.2025 г. за счет средств Российского научного фонда

Введение

Современная селекция для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных все шире использует достижения молекулярной генетики [1]. Маркеры мясной продуктивности обнаружены в целом ряде генов, что позволило их использовать для отбора лучших производителей и формирования родительских пар [2]. Селекция по полиморфизмам в этих генах дает хорошие результаты по улучшению пород овец, но многие из них встречаются в породах либо редко, либо в виде положительных гомозиготных генотипов, как замена с*.1232 в гене миостатина у мериносовых пород овец [3]. Это указывает на необходимость поиска новых полиморфизмов в геноме овец, достоверно связанных с продуктивными качествами, для использования их в качестве молекулярно-генетических маркеров при селекции [4, 5].

В наших собственных исследованиях по полногеномному поиску ассоциаций между продуктивными признаками у овец и однонуклеотидными полиморфизмами выявлено несколько локусов, в одном из которых располагались четыре замены с достоверными ассоциациями. Аннотирование рядом расположенных генов позволило предложить ген *FRY* в качестве кандидата, влияющего на изучаемые параметры мясной продуктивности у овец [6].

Транскрипция гена *FRY* (Furry, Microtubule Binding Protein) дает РНК, кодирующую крупный белок массой больше 300 кДа. Он участвует в процессе сборки микротрубочек во всех клеточных структурах, считается важным компонентом веретена деления и очень консервативен в эволюционном плане. Структура гена *FRY* мало отличается между низшими и высшими животными [7].

Ген *FRY* периодически упоминается во многих исследованиях различных продуктивных признаков у сельскохозяйственных животных и их связи с наследственным аппаратом. При изучении жирнохвостых овец и их адаптационного потенциала к существованию в условиях центральной Африки ген

FRY был определен как один из перспективных генов-кандидатов, связанных с исследуемыми особенностями фенотипа [8]. Сравнение генетической структуры пород суффолк и рамбулье выявило ряд подписей селекции, в которых также фигурировал ген *FRY* как участвующий в реализации специфических породных признаков [9]. Также ген *FRY* предложен как один из генов-кандидатов целого ряда признаков воспроизводства, особенностей поведения, роста и развития у овец [10].

Работы по поиску генов-кандидатов, связанных с адаптацией к климатическим особенностям холодного и жаркого климата у овец, выявили достоверную связь с регионом на 10-й хромосоме. При этом там же обнаружен локус количественных признаков ряда параметров мясной продуктивности. В составе обнаруженного участка ДНК выявлены два гена, *FRY* и *RXFP2*, предположительно связанные с изучаемыми признаками [11]. Поиск селекционных подписей, лежащих в основе породных различий американских овец пород рамбулье, дорпер и катадин, выявил достоверно связанные с породами локусы генома. В одном из них аннотирован ген *FRY*, отличающий от других породу рамбулье. Так как породы в исследовании имеют существенную разницу в живой массе, можно предположить, что это один из породных признаков, закрепленных в ходе селекционной работы и связанный с функцией гена *FRY* [12].

В исследованиях Adeniyi O.O. с соавторами (2024) по усвоению отдельных микроэлементов в овец и выявлению связанных с этим процессом генов установлена достоверная связь одного из регионов хромосомы 10 с показателями поглощения меди из корма [13]. Картирование локуса с поиском генов-кандидатов показало, что он содержит два гена - *FRY* и *RXFP2*. С ними авторы связывают особенности обменных процессов у овец. В другом исследовании оценивали связь уровня экспрессии гена *FRY* с весом тела у лабораторных мышей. Результаты показали, что выключение гена прямым

нокаутом приводит к существенному снижению веса тела в процессе роста детенышей [14].

Достаточно много свидетельств получено об ассоциации региона ДНК, включающего ген *FRY* с особенностями фенотипа различных видов животных. Прямых исследований связи структуры этого гена с параметрами продуктивности у сельскохозяйственных животных не проводилось, несмотря на то, что исследование особенностей строения генов, связанных с ростом и развитием животных, лежит в основе работ по использованию генетических технологий при селекции на увеличение выхода баранины.

Одной из наиболее перспективных в плане повышения мясной продуктивности российских пород овец, адаптированных к условиям местного климата и кормовой базы, является маньчжурский меринос. Порода была выведена на основе улучшения шерстных качеств овец ставропольской породы и зарегистрирована в 1993 году. Животные имеют высокие показатели качества шерсти в сочетании с крупным телосложением, обеспечивающим хороший выход мясной продукции. Опыт показывает, что маньчжурские мериносы показывают высокую продуктивность в различных климатических зонах и могут быть использованы в промышленном производстве баранины. Наибольшая часть поголовья овец этой породы в настоящее время находится в регионе засушливых степей на Северном Кавказе, где они разводятся в племенных и товарных хозяйствах [15].

Цель исследований – изучение распределения отдельных полиморфизмов в составе гена *FRY*, выявленных методом секвенирования нового поколения, между группами животных с разной живой массой для обнаружения новых молекулярно-генетических маркеров прижизненных параметров мясной продуктивности.

Материалы и методы

Исследования проводили на базе лабораторий Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства (ВНИИОК) – филиала ФГБНУ “Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр” и Геномного центра Северо-Кавказского федерального университета.

Объектом исследования служили 30 баранчиков породы маньчжурский меринос в возрасте девяти месяцев из СПК им. Ленина Апанасенковского района Ставропольского края. Животных отбирали методом случайной выборки, они были клинически здоровыми и получали смешанный рацион. Для определения живой массы баранчиков перед утренним кормлением взвешивали на платформенных весах с точностью до 10 г.

Геномную ДНК выделяли из образцов крови, полученных из яремной вены в асептических условиях. Пробы крови отбирали в пробирки Vacutainer® со стабилизатором ЭДТА (Becton Dickinson International, США). ДНК выделяли из 0,1 мл

крови с использованием набора для экстракции нуклеиновых кислот “МагноПрайм ВЕТ” (НекстБио, Россия) согласно инструкции производителя. Концентрацию ДНК в растворе измеряли на флуориметре “Qubit 4.0” (Invitrogen/Life Technologies, США). Контроль качества (OD260/280) проводили на спектрофотометре NanoDrop OneC (Thermo-Fisher Scientific, Inc., США).

Секвенирование проводили с использованием геномного секвенатора NovaSeq 6000 (Illumina, Inc., США). Полученные в результате секвенирования фрагменты со средней длиной 153 нуклеотида картировали на референсный геном *Ovis aries*, сборка ARS-UI_Ramb_v2.0 NCBI (National Center for Biotechnology Information). Для описания обнаруженных однонуклеотидных замен использовалась номенклатура HGVS (Human Genome Variation Society). Статистическую обработку выполняли с использованием t-критерия Стьюдента и критерия Хи-квадрат в Excel для Windows (Microsoft, США). Достоверными считали различия при $p < 0,05$.

Результаты

Проведено исследование различий по частоте встречаемости отдельных полиморфизмов в составе гена *FRY* между двумя группами баранов породы маньчжурский меринос, отличающихся между собой по показателям живой массы. Отобранные методом случайной выборки 30 баранов разделены на две группы по величине показателя живой массы. В первую группу вошли 16 животных с более высокими параметрами живой массы, со средними показателем, составившим $57,2 \pm 1,28$ кг. Небольшой коэффициент вариации 8,7 % указывает на близкие по величине живые массы отдельных животных в полученной выборке. Во второй группе маньчжурские мериносы (14 голов) имели меньшую живую массу, в среднем $42,4 \pm 0,63$ кг. Коэффициент вариации, как и у первой группы, был небольшим (5,4 %), что указывает на близкие по величине параметры по изучаемому показателю внутри группы. По живой массе различия между двумя выборками животных являлись достоверными при $p < 0,001$. Животные в первой группе достоверно больше в среднем на 14,8 кг (34,9 %) относительно показателей второй группы.

Всего проанализировано 4806 вариантов полиморфизмов, обнаруженных нами в области гена *FRY* и непосредственно прилежащих к нему областях ДНК у овец породы маньчжурский меринос. Не соответствовали параметрам по частоте встречаемости минорного аллеля (меньше 5 %) 2105 полиморфизмов, которые не использовались в дальнейшем исследовании. Для дальнейшего анализа нами выбраны полиморфизмы в гене *FRY* с наибольшей частотой встречаемости референсного аллеля в любой из двух групп животных. К ним добавлены полиморфизмы с наибольшей встречаемостью мутантного аллеля, также в любой из групп (табл.1). По указанным критериям наибольшей частоты

встречаемости одного из аллелей в итоге выбраны 22 полиморфизма, расположенных на всем протяжении изученной области ДНК.

В первой группе из более крупных баранов породы маньчжский меринос выявлено четыре полиморфизма в позициях 29258715, 29259950, 29261187 и 29261717, для которых число выявленных референсных аллелей (30 из 32) стало наибольшим, что составило частоту встречаемости 93,75 % в группе. Все эти полиморфизмы представлены 14 гомозиготными генотипами по референсному аллелю и еще два генотипа встречались в гетерозиготном варианте. Минимальное количество референсных аллелей (20 из 32) имели пять полиморфизмов в позициях 29037775, 29037940, 29042120 и 29042614. Частота встречаемости референсного аллеля для этих полиморфизмов составила 62,5 %. Они представлены у шести особей в виде референсного гомозиготного генотипа, у двух особей в виде мутантного гомозиготного генотипа, а 8 животных являлись гетерозиготами по изучаемым полиморфизмам. Для этих же локусов зафиксирована максимальная частота встречаемости мутантного аллеля (37,5 %) среди животных с большей живой массой. Наименьшая частота встречаемости мутантного аллеля (6,25 %) в первой группе баранов (большая живая масса) отмечена для 4 полиморфизмов.

Во второй группе животных с меньшими показателями живой массы четыре полиморфизма показали наибольшую встречаемость референсного аллеля, составившую 26 из 28, что соответствует частоте встречаемости 92,9 %. Полиморфизмы находились в позициях 29037775, 29037940, 29042120 и 29042614 и совпадали с полиморфизмами, показавшими наибольшую частоту встречаемости мутантного аллеля в первой группе маньчжских мериносов. Наименьшая частота встречаемости референсного аллеля во второй группе 46,4 % (или 13 из 28) выявлена для одного полиморфизма из отобранных для анализа, находящегося в позиции 29224716. Мутантный аллель с максимальной встречаемостью во второй группе животных, составившей 53,6 %, обнаруживался у одного полиморфизма в позиции 29224716. Минимальные показатели выявления мутантного аллеля во второй группе (7,14 %) зафиксированы для четырех полиморфизмов, которые имели также максимумы по встречаемости референсного аллеля, соответственно. Полиморфизмов, для которых один из аллелей встречался бы исключительно в одной группе исследуемых животных, в составе гена *FRY* не выявлено. Однако, для 17 полиморфизмов из 22 было обнаружено, что мутантный гомозиготный генотип по ним обнаруживается только во второй группе животных, хотя и в небольших количествах (от 1 до 5 животных). В первой группе животных нами отмечены 5 полиморфизмов, которые имели

мутантный гомозиготный генотип у 1-2 животных, а во второй группе, с меньшей живой массой, мутантные гомозиготные генотипы по этим позициям вообще не обнаруживали.

Для каждого из полиморфизмов проведена оценка ассоциации распространенного или мутантного аллельного варианта с живой массой на основе построения таблиц сопряженности и вычисления критерия хи-квадрат (табл. 2). Для оценки использовали различия в количестве аллельных вариантов, встречающихся в двух группах, исследуемых маньчжских мериносов. Из 22 проанализированных полиморфизмов достоверную ассоциацию показали все, поэтому все они использовались для дальнейшего изучения функциональных свойств. В первой группе животных референсный аллель встречался чаще мутантного для всех изучаемых полиморфизмов. Самые высокие показатели отмечены для полиморфизмов в позициях 29258715, 29259950, 29261187 и 29261717. В этих точках только референсный аллель (гомозиготный генотип) выявлен у 14 животных из 16, а по 2 особи являлись носителями гетерозиготного генотипа. Наибольшее количество мутантных аллелей в группе животных с большим весом обнаружено для полиморфизмов в точках с координатами 29037775, 29037940, 29042120 и 29042614. Во всех этих точках мутантный аллель представлен в виде гомозиготных генотипов у двух животных и еще у 8 встречался в составе гетерозигот. Однако, для этих локусов, как и для всех других, отмечено преобладание количества референсных аллелей.

Во второй группе животных с более низкой живой массой референсный аллель по достоверно ассоциированным полиморфизмам чаще всего встречался в локусах 29037775, 29037940, 29042120 и 29042614. У большинства животных он обнаруживался в виде гомозиготного варианта (12 особей) и у 2 животных находился в составе гетерозигот. Максимальное количество мутантного аллеля выявлено для полиморфизма в позиции 29224716. Он обнаруживался в равном количестве в гетерозиготном варианте (5 голов) и мутантном гомозиготном варианте (5 особей). Полиморфизмов с полным отсутствием альтернативного, то есть либо референсного, либо мутантного аллелей в одной из исследуемых групп, не выявлено. В первой группе животных в виде мутантного гомозиготного генотипа 5 полиморфизмов обнаруживали в минимальном количестве, для остальных полиморфизмов мутантных гомозиготных вариантов выявлено не было. Во второй группе маньчжских мериносов в разном количестве встречались все виды генотипов по достоверно ассоциированным с живой массой полиморфизмам, только для 4 локусов не выявлен один из вариантов генотипов – мутантный гомозиготный.

Таблица 1. Различия по встречаемости генотипов и аллельных вариантов полиморфизмов гена *FRY* между группами баранов породы маньчжский меринос с разной живой массой

Позиция в хромосоме	Название в базе данных	Группа I (живая масса 57,2±1,3 кг, n=16)					Группа II (живая масса 42,4±0,6 кг, n=14)				
		Количество генотипов			Число аллелей		Количество генотипов			Число аллелей	
		PP	PM	MM	P	M	PP	PM	MM	P	M
29037775	rs415007546	6	8	2	20	12	12	2		26	2
29037940	rs408974462	6	8	2	20	12	12	2		26	2
29042120	Нет в базе	6	8	2	20	12	12	2		26	2
29042614	rs407772176	6	8	2	20	12	12	2		26	2
29113535	Нет в базе	12	3	1	27	5	4	7	3	15	13
29213715	rs416888573	12	4		28	4	5	6	3	16	12
29213891	rs429574984	12	4		28	4	5	6	3	16	12
29224716	Нет в базе	13	3		29	3	4	5	5	13	15
29246963	rs406260133	13	3		29	3	3	9	2	15	13
29258715	rs403746981	14	2		30	2	5	8	1	18	10
29259950	rs419606296	14	2		30	2	5	8	1	18	10
29261187	rs407133298	14	2		30	2	5	8	1	18	10
29261717	rs421905216	14	2		30	2	5	8	1	18	10
29263076	rs429678265	12	4		28	4	6	5	3	17	11
29270018	rs421323728	11	5		27	5	6	5	3	17	11
29270141	rs420021997	11	5		27	5	5	5	4	15	13
29271270	rs417997638	11	5		27	5	6	5	3	17	11
29271274	rs430587649	11	5		27	5	5	6	3	16	12
29271323	rs407045468	11	5		27	5	6	5	3	17	11
29271367	rs416250126	11	5		27	5	6	5	3	17	11
29273722	Нет в базе	12	4		28	4	6	5	3	17	11
29358679	rs429507742	11	5		27	5	5	6	3	16	12

Примечания: P – референсный аллель; M – мутантный аллель.

Таблица 2. Ассоциация аллельных вариантов полиморфизмов гена *FRY* с живой массой у баранов породы маньчжский меринос

Позиция в хро- мосоме	Название в базе дан- ных	Живая масса				Хи-квадрат	P
		Высокая (n=16)		Низкая (n=14)			
		P	M	P	M		
29037775	rs415007546	20	12	26	2	7.693	0.006
29037940	rs408974462	20	12	26	2	7.693	0.006
29042120	Нет в базе	20	12	26	2	7.693	0.006
29042614	rs407772176	20	12	26	2	7.693	0.006
29113535	Нет в базе	27	5	15	13	6.747	0.010
29213715	rs416888573	28	4	16	12	7.037	0.008
29213891	rs429574984	28	4	16	12	7.037	0.008
29224716	Нет в базе	29	3	13	15	13.890	0.001
29246963	rs406260133	29	3	15	13	10.484	0.002
29258715	rs403746981	30	2	18	10	8.103	0.005
29259950	rs419606296	30	2	18	10	8.103	0.005
29261187	rs407133298	30	2	18	10	8.103	0.005
29261717	rs421905216	30	2	18	10	8.103	0.005
29263076	rs429678265	28	4	17	11	5.714	0.017
29270018	rs421323728	27	5	17	11	4.275	0.039
29270141	rs420021997	27	5	15	13	6.747	0.010
29271270	rs417997638	27	5	17	11	4.275	0.039
29271274	rs430587649	27	5	16	12	5.454	0.020
29271323	rs407045468	27	5	17	11	4.275	0.039
29271367	rs416250126	27	5	17	11	4.275	0.039
29273722	Нет в базе	28	4	17	11	5.714	0.017
29358679	rs429507742	27	5	16	12	5.454	0.020

Примечания: P – референсный аллель; M – мутантный аллель.

Функциональный анализ достоверно ассоциированных с живой массой полиморфизмов у баранов породы маньчжский меринос показал, что большинство из них имели характер однонуклеотидных замен, были ранее обнаружены у других пород овец и внесены в международную базу данных с присвоением уникального идентификатора. Три

полиморфизма, в позициях 29042120, 29224716 и 29273722, описаны нами впервые. В точках 29042120 и 29273722 полиморфизмы представлены делециями, первая на одну пару нуклеотидов, вторая – на четыре. В позиции 29224716 нами обнаружена инсерция длиной в 1 пару нуклеотидов G(C).

Таблица 3. Характеристика полиморфизмов гена *FRY*, ассоциированных с живой массой у баранов породы маньчский меринос

Позиция	Наименование	Область гена, положение, вид замены	Аллели	
			P	M
29037775	rs415007546	Инtron, с.8827-2283, G>A	C	T
29037940	rs408974462	Инtron с.8827-2448, G>A	C	T
29042120	Нет в базе	Инtron, с.8743-139, delT	GAAAA	GAAA
29042614	rs407772176	Инtron, с.8743-629, A>C	T	G
29113535	Нет в базе	Инtron, с.4107-3706, G>A	C	T
29213715	rs416888573	Инtron, с.631-12088, A>G	T	C
29213891	rs429574984	Инtron, с.631-12264, G>C	C	G
29224716	Нет в базе	Инtron, с.630+5647_630+5648, insGGGGGGGAGG	TCCCCC	TCCCCC
29246963	rs406260133	Инtron, с.431-16394, G>A	C	T
29258715	rs403746981	Инtron, с.431-28146, A>G	T	C
29259950	rs419606296	Инtron, с.431-29381, G>A	C	T
29261187	rs407133298	Инtron, с.431-30618, A>G	T	C
29261717	rs421905216	Инtron, с.431-31148, A>G	T	C
29263076	rs429678265	Инtron, с.431-32507, G>A	C	T
29270018	rs421323728	Инtron, с.431-39449, C>T	G	A
29270141	rs420021997	Инtron, с.431-39572, G>C	C	G
29271270	rs417997638	Инtron, с.431-40701, C>T	G	A
29271274	rs430587649	Инtron, с.431-40705, G>T	C	A
29271323	rs407045468	Инtron, с.431-40754, G>A	C	T
29271367	rs416250126	Инtron, с.431-40798, G>A	C	T
29273722	Нет в базе	Инtron, с.431-43160_431-43157, delAGAG	ttctctct	ttct
29358679	rs429507742	Инtron, с.430+566, T>C	A	G

Примечания: P – референсный аллель; M – мутантный аллель.

Обсуждение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что строение гена *FRY* связано с фенотипическими особенностями, характеризующими параметры мясной продуктивности у овец, которые выражаются в виде изменения живой массы. Ранее нами обнаружено, а также подтверждено рядом других исследователей, что в локусе рядом с геном *FRY* находятся однонуклеотидные полиморфизмы, связанные с показателями роста и развития овец. Это послужило основанием предложить этот ген в качестве кандидата, влияющего на продуктивные качества животных. Следующим этапом стало пристальное исследование его структуры для поиска полиморфизмов внутри гена, которые могли бы доказать его связь с изучаемыми параметрами фенотипа.

Изучена структура гена *FRY* у овец породы маньчский меринос по результатам полного секвенирования генома у 30 животных и выполнен анализ ассоциаций обнаруженных полиморфизмов с показателями живой массы в возрасте 9 месяцев. Проведенное исследование показало достаточно большое количество полиморфизмов в составе гена, отличающего его от референсной сборки Ramboulie 2.0, размещенной в базе данных геномов NCBI. Всего проанализировано 4806 структурных изменений, представленных однонуклеотидными полиморфизмами, инсерциями и делециями. Из общего количества обнаруженных полиморфизмов 2105 имели частоту встречаемости одного из аллелей меньше 5% и были исключены из дальнейшего анализа независимо от полученных показателей достоверности ассоциаций. Низкое число аллелей таких полиморфизмов в популяции не позволяет использовать их в дальнейшем как молекулярные маркеры при селекции для повышения мясной продуктивности. Среди остальных

полиморфизмов нами отобраны 22, которые показали достоверные различия по частоте встречаемости в двух группах маньчских мериносов, отличающихся по живой массе в среднем на 14,8 кг. Разница по живой массе у животных, отличающихся по полиморфизмам в гене *FRY*, оказалась более существенной, чем у овец, отличающихся по строению гена миостатина, известного своим влиянием на развитие мышечной ткани [16].

Особого внимания заслуживают полиморфизмы гена *FRY* в позициях 29258715, 29259950, 29261187 и 29261717. Как показали наши исследования, у животных с большей живой массой по заменам в этих точках встречается преимущественно референсный гомозиготный генотип. Из 16 животных только два имели гетерозиготный генотип по всем четырем полиморфизмам, остальные 13 являлись носителями исключительно референсного гомозиготного генотипа. При этом в группе животных с низкой живой массой референсный гомозиготный генотип встречался всего у 5 животных из 14, остальные 9 особей несли гетерозиготный (8 голов) и мутантный гомозиготный генотип (1 голова). Все четыре полиморфизма имеют характер однонуклеотидных замен и расположены на относительно небольшом участке длиной около 3000 пар нуклеотидов в интроне гена, то есть не кодируют непосредственно аминокислотную последовательность. В дальнейшем это дает основания для более глубоких исследований по связи выявленного комплекса замен с уровнем экспрессии гена *FRY* в мышечной ткани у овец. Имеется уже достаточно большое количество свидетельств о влиянии полиморфизмов в интронах генов на их транскрипцию, сплайсинг и функциональную активность белкового продукта у овец [5]. Однако, уже на сегодняшнем этапе можно сделать заключение о возможности

использования этих четырех полиморфизмов в качестве молекулярно-генетических маркеров при селекции овец для повышения мясной продуктивности. В разведение целесообразно пускать животных с референсным гомозиготным генотипом, встречающимся преимущественно у животных с большей живой массой, выбраковывая особей с гетерозиготным и мутантным гомозиготным генотипом.

Еще два полиморфизма также могут быть рассмотрены в качестве перспективных молекулярных маркеров. Они локализованы в позициях 29224716 и 29273722. Особенностью этих полиморфизмов является то, что один из них является инсерцией, а второй – делецией. Они расположены в разных интронах гена *FRY*. При этом, оба этих полиморфизма ранее не описаны, не внесены в международные базы данных и обнаружены нами у овец впервые. Оказалось, что животные с большей живой массой имеют преимущественно референсный гомозиготный генотип по обоим этим полиморфизмам. Только 3 особи из 16 несут гетерозиготный вариант по наличию инсерции в гене и 4 животных из 16 имели гетерозиготный генотип по делеции. У животных с низкой живой массой инсерция в позиции 29224716 представлена референсным гомозиготным генотипом всего у 4 исследованных баранов, а остальные 10 голов имеют гетерозиготные и мутантные гомозиготные генотипы. Манычские меринсы с большей живой массой имеют в своем большинстве (12 из 16) референсный гомозиготный генотип по делеции в позиции 29273722, а четыре особи являются носителями гетерозиготной формы генотипа. Во второй группе животных (с низкой живой массой) референсный гомозиготный генотип выявлен только у 6 животных, а у остальных восьми обнаружен гетерозиготный (6 голов) и мутантный гомозиготный (2 головы) варианты генотипов. При использовании обнаруженных полиморфизмов в качестве молекулярных маркеров необходимо отбирать для разведения особей с референсным гомозиготным генотипом по обоим позициям, а выбраковывать носителей гетерозиготных и мутантных гомозиготных генотипов, преимущественно имеющих более низкую живую массу.

Использование выявленных в ходе исследования полиморфизмов в качестве молекулярных маркеров мясной продуктивности открывает большие перспективы для применения маркер-ассоциированной селекции для повышения хозяйственной ценности овец породы манычский меринос [17-20]. За счет внедрения в животноводство тестирования по обнаруженным полиморфизмам за пару поколений вполне возможно увеличить среднюю живую массу овец породы манычский меринос в возрасте 9 месяцев (а в перспективе – и других пород тонкорунного направления) на 15...25 %. Полученный результат соответствует приблизительно 5 дополнительным килограммам баранины, полученным с каждого животного при среднем выходе мясной продукции 40 % с туши. Учитывая рыночную стоимость мяса, это в

значительной мере повысит рентабельность мясного овцеводства при сохранении существующих затрат на кормление и содержание.

Заключение

Изучение строения гена *FRY* по анализу распределения 4806 полиморфизмов у баранчиков породы манычский меринос показало, что 2105 из них встречаются редко (менее 5 %) и не представляют интереса для использования в селекции. Среди 20 полиморфизмов, показавших наибольшую величину различий по частоте встречаемости между группами животных с большей и меньшей массой тела, наиболее перспективными в плане использования в качестве молекулярных маркеров продуктивности определены шесть полиморфизмов. Четыре из них представлены однонуклеотидными заменами, расположенными на участке ДНК длиной 3000 пар нуклеотидов. Один полиморфизм является инсерцией, а один – делецией. Все полиморфизмы находятся в интронах гена. Разница в живой массе между группами носителей разных генотипов по этим полиморфизмам составляет 14,8 кг (34,9 %), что является существенным показателем для манычских мериносов. Таким образом, обнаруженные в составе гена *FRY* полиморфизмы показали достоверную связь с показателями живой массы у овец породы манычский меринос и могут быть использованы в качестве генетических маркеров при селекции для повышения мясной продуктивности.

Литература

1. Бригида А.В., Приданова И.Е. Биотехнологические методы ускоренного воспроизводства овец молочного направления продуктивности (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 7. С. 73-82. doi: 10.53859/02352451_2025_39_7_73
2. Поиск ассоциаций однонуклеотидных замен с показателями молока восточно-фризских овец на основе полногеномного анализа / М. И. Селионова, В. И. Трухачев, Н. А. Зиновьева и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 9. С. 42-49. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_42.
3. Денискова Т. Е., Доцев А. В., Зиновьева Н. А. Идентификация генов-кандидатов, ассоциированных с экономически значимыми признаками, на основе анализа островков гомозиготности в геноме пород овец, разводимых в России // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 9. С. 80-86. doi:10.53859/02352451_2023_37_9_80
4. Polymorphism of genes and their impact on beef quality / P. Kostusiak, J. Ślósarz, M. Gołębiewski, et al. // Current Issues in Molecular Biology. 2023. Vol. 45. P. 4749-4762. doi: 10.3390/cimb4506030
5. Grochowska E., Borys B., Mroczkowski S. Effects of intronic SNPs in the myostatin gene on growth and carcass traits in colored Polish merino sheep // Genes. 2019. Vol. 11. No. 2. P. 20-38. doi: 10.3390/genes11010002

6. Krivoruchko A. Y., Yatsyk O. A., Safaryan E. Y. Candidate genes for productivity identified by genome-wide association study with indicators of class in the Russian meat merino sheep breed // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Vol. 24. No. 8. P. 836-843. doi: 10.18699/VJ20.681
7. Nagai T., Mizuno K. Multifaceted roles of Furry proteins in invertebrates and vertebrates // The Journal of Biochemistry. 2014. Vol. 155. No. 3. P. 137–146. doi: 10.1093/jb/mvu00.
8. Genome-Wide Variation, Candidate Regions and Genes Associated With Fat Deposition and Tail Morphology in Ethiopian Indigenous Sheep / A. Ahbara, H. Bahbahani, F. Almathen, et al. // Frontiers in Genetics. 2019. Vol. 9. P. 699. doi: 10.3389/fgene.2018.00699
9. Genome-wide genetic diversity and differentially selected regions among Suffolk, Rambouillet, Columbia, Polypay, and Targhee sheep / L. Zhang, M.R. Mousel, X. Wu, et al. // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. No. 6. doi: 10.1371/journal.pone.0065942. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23762451/> (Дата обращения: 03.05.2025)
10. Identification of Candidate Genes and Pathways Linked to the Temperament Trait in Sheep / E. Romaniuk, B. Vera, P. Peraza, et al. // Genes. 2024. Vol. 15. No. 2. P. 229. doi: 10.3390/genes15020229
11. Whole-genome scan for selection signature associated with temperature adaptation in Iranian sheep breeds / Z. Patiabadi, M. Razmkabir, A. Esmailizadeh Koshkoiyeh, et al. // PLoS ONE. 2024. Vol. 19. No. 8. Art. e0309023. doi: 10.1371/journal.pone.0309023. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39150936/> (Дата обращения: 03.05.2025)
12. Genetic diversity of United States Rambouillet, Katahdin and Dorper sheep / G.M. Becker, J.W. Thorne, J.M. Burke, et al. // Genetics Selection Evolution. 2024. Vol. 56. No. 56. doi: 10.1186/s12711-024-00905-7
13. Genome-wide comparative analyses for selection signatures indicate candidate genes for between-breed variability in copper accretion in sheep / O.O. Adeniyi, J.A. Lenstra, S. Mastrangelo, et al. // Animal. 2024. Vol. 18. No. 10. P. 101329. doi: 10.1016/j.animal.2024.101329
14. Fry Is Required for Mammary Gland Development During Pregnant Periods and Affects the Morphology and Growth of Breast Cancer Cells / Y. Liu, X. Chen, Z. Gong, et al. // Frontiers in Oncology. 2019. Vol. 9. P. 1279. doi: 10.3389/fonc.2019.01279
15. Абонеев В. В., Милькевич А. В., Суров А. И. Эффективность скрещивания овец ставропольской породы с баранами маньчжский меринос // Овцы, козы и шерстяное дело. 2009. № 3. С. 19-21.
16. Genetic variations in the Myostatin gene affecting growth traits in sheep / N.M. Osman, H.I. Shafey, M.A. Abdelhafez, et al. // Veterinary World. 2021. Vol. 14. No. 2. P. 475-482. doi: 10.14202/vetworld.2021.475-482.
17. Новые полиморфизмы гена CNTN3, ассоциированные с показателями мясной продуктивности у овец породы маньчжский меринос / Д.Е. Баранова, А.Ю. Криворучко, О.А. Яцык, и др. // Аграрный вестник Северного Кавказа. 2025. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-polimorfizmy-gena-cntn3-assotsirovannye-s-pokazatelyami-myasnoy-produktivnosti-u-ovets-porody-manychskiy-merinos> (дата обращения: 03.03.2026).
18. Широкова Н. В., Федоров В. Х., Ряска В. К. Молекулярно-генетические исследования полиморфизма генов CAST, MSTN // Главный зоотехник. 2025. № 12(269). С. 42-52. doi: 10.33920/sel-03-2512-05.
19. Potential candidate genes influencing meat production phenotypic traits in sheep: A review / Y. Han, M.F. Akhtar, W. Chen, et al. // Frontiers in Veterinary Science. 2025. Vol. 12. P. 1616533.
20. Molecular markers associated with growth, meat, and carcass traits in sheep: a review / A. Begenova, R. Bissengaliyev, T. Kulmagambetov, et al. // Animal Biotechnology. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 2526458.

References

1. Brigida A.V., Pridanova I.E. Biotechnological Methods for Accelerated Reproduction of Dairy Sheep (Review) // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025. Vol. 39, No. 7. P. 73-82. doi: 10.53859/02352451_2025_39_7_73.
2. Search for Associations of Single Nucleotide Polymorphisms with Milk Traits in East Friesian Sheep Based on Genome-Wide Analysis / M. I. Selionova, V. I. Trukhachev, N. A. Zinovieva, et al. // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024. Vol. 38, No. 9. Pp. 42-49. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_42
3. Deniskova T. E., Dotsev A.V., Zinovieva N.A. Identification of Candidate Genes Associated with Economically Important Traits Based on the Analysis of Runs of Homozygosity in the Genome of Sheep Breeds Reared in Russia // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023. Vol. 37. No. 9. P. 80-86. doi: 10.53859/02352451_2023_37_9_80
4. Polymorphism of genes and their impact on beef quality / P. Kostusiak, J. Ślósarz, M. Gońbiewski et al. // Current Issues in Molecular Biology. 2023. Vol. 45. P. 4749–4762. doi: 10.3390/cimb4506030
5. Grochowska E., Borys B., Mroczkowski S. Effects of intronic SNPs in the myostatin gene on growth and carcass traits in colored Polish merino sheep // Genes. 2019. Vol. 11, No. 2. P. 20–38. doi: 10.3390/genes11010002
6. Krivoruchko A. Y., Yatsyk O. A., Safaryan E. Y. Candidate genes for productivity identified by genome-wide association study with indicators of class in the Russian meat merino sheep breed // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. Vol. 24. No. 8. P. 836–843. doi: 10.18699/VJ20.681
7. Nagai T., Mizuno K. Multifaceted roles of Furry proteins in invertebrates and vertebrates // The Journal of Biochemistry. 2014. Vol. 155. No. 3. P. 137–146. doi: 10.1093/jb/mvu001

8. Genome-Wide Variation, Candidate Regions and Genes Associated With Fat Deposition and Tail Morphology in Ethiopian Indigenous Sheep / A. Ahbara, H. Bahbahani, F. Almathen, et al. // *Frontiers in Genetics*. 2019. Vol. 9. P. 699. doi: 10.3389/fgene.2018.00699
9. Genome-wide genetic diversity and differentially selected regions among Suffolk, Rambouillet, Columbia, Polypay, and Targhee sheep / L. Zhang, M.R. Mousel, X. Wu, et al. // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8. No. 6. Art. e65942. doi: 10.1371/journal.pone.0065942. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23762451/> (accessed: 03.05.2025)
10. Identification of Candidate Genes and Pathways Linked to the Temperament Trait in Sheep / E. Romaniuk, B. Vera, P. Peraza, et al. // *Genes*. 2024. Vol. 15. No. 2. P. 229. doi: 10.3390/genes15020229.
11. Whole-genome scan for selection signature associated with temperature adaptation in Iranian sheep breeds / Z. Patiabadi, M. Razmkabir, A. Esmailizadeh Koshkoiyeh, et al. // *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 8. Art. e0309023. doi: 10.1371/journal.pone.0309023. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39150936/> (accessed: 03.05.2025)
12. Genetic diversity of United States Rambouillet, Katahdin and Dorper sheep / G.M. Becker, J.W. Thorne, J.M. Burke, et al. // *Genetics Selection Evolution*. 2024. Vol. 56, doi: 10.1186/s12711-024-00905-7. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23762451/> (accessed: 03.05.2025)
13. Genome-wide comparative analyses for selection signatures indicate candidate genes for between-breed variability in copper accretion in sheep / O.O. Adeniyi, J.A. Lenstra, S. Mastrangelo, et al. // *Animal*. 2024. Vol. 18, No. 10. Art. 101329. doi: 10.1016/j.animal.2024.101329
14. Fry Is Required for Mammary Gland Development During Pregnant Periods and Affects the Morphology and Growth of Breast Cancer Cells / Y. Liu, X. Chen, Z. Gong, et al. // *Frontiers in Oncology*. 2019. Vol. 9. P. 1279. doi: 10.3389/fonc.2019.01279
15. Aboneev V. V., Milkevich A. V., Surov A. I. Efficiency of crossing Stavropol breed sheep with Manych Merino rams // *Sheep, goats and wool business*. 2009. No. 3. P. 19-21.
16. Genetic variations in the Myostatin gene affecting growth traits in sheep / N.M. Osman, H.I. Shafey, M.A. Abdelhafez, et al. // *Veterinary World*. 2021. Vol. 14. No 2. P. 475–482. doi: 10.14202/vetworld.2021.475-482
17. New polymorphisms of the *CNTN3* gene associated with meat productivity traits in sheep of the Manych Merino breed / D.E. Baranova, A.Y. Krivoruchko, O.A. Yatsyk, et al. // *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2025. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-polimorfizmy-gena-cntn3-assotsirovannye-s-pokazatelyami-myasnoy-produktivnosti-u-ovets-porody-manychskiy-merinos> (accessed: 03.03.2026).
18. Shirokova N.V., Fedorov V.Kh., Ryaska V.K. Molecular genetic studies of *CAST* and *MSTN* gene polymorphism // *Glavny Zootekhnik (Head of Animal Breeding)*. 2025. No. 12(269). P. 42-52. doi: 10.33920/sel-03-2512-05
19. Potential candidate genes influencing meat production phenotypic traits in sheep: A review / Y. Han, M.F. Akhtar, W. Chen, et al. // *Frontiers in Veterinary Science*. 2025. Vol. 12. P. 1616533.
20. Molecular markers associated with growth, meat, and carcass traits in sheep: a review / A. Begenova, R. Bissengaliyev, T. Kulmagambetov, et al. // *Animal Biotechnology*. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 2526458.

Влияние типа кормления на технологические свойства и аминокислотный состав молока коров красно-пестрой породы

А. П. Вельматов¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории животноводства

Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства

Т. Н. Тишкина²✉, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции

¹Мордовский НИИСХ – филиал ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока

430904, Республика Мордовия, г. Саранск, р.п. Ялга, ул. Мичурина, д. 5

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68

✉kafedra_tpppz@agro.mrsu.ru

Резюме. Исследования проводили с целью изучения влияния скармливания различных типов рациона кормления на молочную продуктивность, сыропригодность и аминокислотный состав молока коров красно-пестрой породы. Опыт провели на лактирующих коровах красно-пестрой породы в ООО «Атьминский» Ромодановского района Республики Мордовия в течение 150 дней на четырех группах по 20 голов в каждой, они были аналогами по лактации, возрасту, происхождению, находились в одних условиях содержания. Первая группа потребляла полнорационную кормовую смесь (сенаж+силос+сено), вторая – рацион с включением силоса, третья – жом и четвертая – барды. В период научно-хозяйственного опыта наивысший удой 3950 кг получен в группе коров, потребляющих полнорационную кормовую смесь, что на 4,9 % ($P \geq 0,95$) больше, чем во второй группе и на 11,6 % ($P \geq 0,999$) и 14,1 % ($P \geq 0,999$) – в третьей и четвертой группах. Среднесуточный удой по первой группе составил 26,3 кг, во второй – 25,1 кг, в третьей – 23,6 кг и в четвертой – 23,1 кг. Больше жира и белка было в молоке первой группы 4,07 и 3,50 %, наименьшие показатели получены по группе коров с жомовым и бардяном типом кормления 3,95...3,98 % ($P \geq 0,95$) и 3,38...3,33 % ($P \geq 0,99$) соответственно. Аналогичная картина наблюдалась и по молочному жиру и белку ($P \geq 0,999$). От молока коров, потреблявших полнорационную кормовую смесь, получен нормальный сгусток, что говорит о пригодности молока для производства твердых сычужных сыров. При жомовом и бардяном типом кормления полученное молоко плохо свертывается, образуя дряблый сгусток, а полученное зерно из этого молока плохо обрабатывалось, остаточная сыворотка имела мутный вид, что говорит о непригодности этого сырья для производства твердых сыров. Молоко, продуцируемое коровами, потреблявшими полнорационную смесь, содержит больше аминокислот на 0,096 г/кг, чем при силосном – на 0,246 г/кг, жомовом – на 0,246 и 0,378 г/кг при бардяном типом кормления. Молочный белок, синтезируемый животными красно-пестрой породы, потреблявших полнорационную смесь, характеризуется большей биологической ценностью $i=0,846$ и $i=0,458$, а при силосном типе рациона $i=0,820$ и $i=0,450$, жомовом $i=0,780$ и 0,438, при бардяном $i=0,746$ и $i=0,427$.

Ключевые слова: порода, тип кормления, рацион, сено, силос, сенаж, удой, жир, белок, аминокислота

Для цитирования: Вельматов А. П., Тишкина Т. Н. Влияние типа кормления на технологические свойства и аминокислотный состав молока коров красно-пестрой породы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 151-157. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-151-157

The impact of feeding type on the technological properties and amino acid composition of milk in red-pied cows

A. P. Velmatov, T. N. Tishkina✉

¹Mordovian Research Institute of Agriculture – Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution, Federal Scientific Center of the North-East

430904, Republic of Mordovia, Saransk, Yalga settlement, Michurin Street, Bldg. 5

²National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev

430005, Saransk, Bolshevistskaya Street, Bldg. 68

✉kafedra_tpppz@agro.mrsu.ru

Abstract. The study was conducted to examine the impact of feeding different types of diets on milk productivity, cheese-making quality, and the amino acid composition of milk in Red-Pied cows. The experiment was conducted on lactating Red-and-White cows at Atminsky LLC in the Romodanovsky District of the Republic of Mordovia for 150 days in four groups of 20 animals each. The cows were matched for lactation status, age, and origin, and were kept in the same housing conditions. The first group consumed a complete feed mixture (haylage + silage + hay), the second a diet containing silage, the third a diet containing pulp, and the fourth a diet containing distillers grains. During the scientific and farming experiment, the highest milk yield of 3,950 kg was obtained in the group of cows consuming the complete feed mixture, which is 4,9%

($P \geq 0.95$) more than in the second group and 11/6% ($P \geq 0.999$) and 14,1% ($P \geq 0.999$) more in the third and fourth groups. The average daily milk yield for the first group was 26.3 kg, for the second – 25,1 kg, for the third – 23,6 kg, and for the fourth – 23.1 kg. The milk of the first group had the highest fat and protein content – 4,07 and 3,50%, respectively. The lowest values were obtained in the group of cows fed with beet pulp and distillers' grains: 3,95–3,98% ($P \geq 0.95$) and 3.38–3,33% ($P \geq 0.99$), respectively. A similar picture was observed for milk fat and protein ($P \geq 0.999$). The milk of cows fed with a complete feed mixture produced a normal curd, indicating that this milk is suitable for the production of hard rennet cheeses. Milk produced by cows fed with pulp and distillers' grains coagulates poorly, forming a flabby curd. The grain produced from this milk was poorly processed, leaving a cloudy residual whey, indicating that this raw material is unsuitable for hard cheese production. Milk produced by cows fed a complete ration contains 0.096 g/kg more amino acids than milk produced by cows fed with silage (0.246 g/kg), pulp (0.246 g/kg), and distillers' grain (0.378 g/kg). Milk protein synthesized by Red-and-White cattle fed a complete diet is characterized by a higher biological value of $i = 0.846$ and $i = 0.458$, while with a silage diet, $i = 0.820$ and $i = 0.450$, with a beet pulp diet, $i = 0.780$ and 0.438, and with a stillage diet, $i = 0.746$ and $i = 0.427$.

Keywords: breed, feeding type, diet, hay, silage, haylage, milk yield, fat, protein, amino acid.

For citation: Velmatov A. P., Tishkina T. N. The impact of feeding type on the technological properties and amino acid composition of milk in red-pied cows // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 151-157 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-151-157

Введение

В последние годы перерабатывающие предприятия предъявляют все более высокие требования к качеству молока. Одним из путей его улучшения является использование высококачественных кормов в кормлении животных. Научой и практикой доказано, что на молочную продуктивность, качественные показатели молока и его технологические свойства большое влияние оказывает полноценное и сбалансированное кормление [1, 2, 3].

В молочном скотоводстве большое внимание уделяется качественным показателям кормов. Молочные коровы хорошо поедают сенаж, приготовленный из трав, проявленных до 45...50 % влажности. Сыр и масло, приготовленное из молока коров, которым скармливали сенаж, обладали приятным вкусом и при оценке были отнесены к высшим сортам [4, 5, 6].

Практика показывает, что при выпасе коров на злаково-бобовых травосмесях и использовании полнорационной кормовой смеси получаемое молоко отличается выраженным ароматом и хорошей свертываемостью под воздействием сычужного фермента.

На использование питательных веществ коровами разных пород существенное влияние оказывает тип рациона. Так в рационе коров, где преобладает пастбищная трава, использование азота составляет 15,4 %, при сенном типе эта разница составляет 4,51 %, а при силосном она оказалась незначительной [7, 8, 9].

На молочную продуктивность и качество молока положительно влияют сенаж из многолетних трав, силос кукурузный и сено злаковое. За последние годы в рационах коров используют высокобелковые компоненты в виде шрота и других биологически ценных добавок. Однако потребление неспецифических кормов не позволяет получать молоко с высоким содержанием жира и белка [10,11,12], поэтому необходимы сбалансированные рационы кормления коров с включением сочных, грубых и концентрированных кормов.

Цель исследований – изучение влияния скармливания полнорационной кормовой смеси, силосного, жомового и бардяного рационов на молочную продуктивность, сыропригодность и аминокислотный состав молока коров красно-пестрой породы.

Материалы и методы

Опыт провели на лактирующих коровах красно-пестрой породы в ООО «Атьминский» Ромодановского района Республики Мордовия в течение 150 дней на четырех группах по 20 голов в каждой. Первая группа была контрольная, остальные три – опытные. Первая группа потребляла полнорационную кормовую смесь (сенаж+силос+сено), вторая – рацион с включением силоса, третья – жом и четвертая – барды. Затраты кормов и качественные показатели рационов для коров представлены в таблицах 1 и 2.

В период научно-хозяйственного опыта ежедневно учитывали молоко, надоенное от каждой коровы, с последующим определением жира и белка в молоке на приборе «Клевер-1М».

Сыропригодность молока определяли в лаборатории ООО «Сыроваренный завод «Сармич» согласно ГОСТ 25228-82, 9225-84 по общепринятым методикам.

Аминокислотный состав молока определяли методом ионообменной хроматографии во Всероссийском научно-исследовательском и технологическом институте птицеводства (ВНИТИП).

Полученные результаты опытов были обработаны биометрически на персональном компьютере с использованием программ, предложенных Н. А. Плехинским, 1969.

Результаты

При проведении опытов использовали в основном корма собственного производства, за исключением жома, барды, шрота подсолнечного и рапсового. Жом свекловичный получен при переработке сахарной свеклы на Ромодановском сахарном заводе, барду брали из Ромодановского спиртзавода. Заводы расположены в поселке Ромоданово в 10 км ООО «Атьминский» (табл. 1).

Таблица 1. Рационы кормления коров

Показатель	Группа животных			
	1-контроль	2-опытная	3-опытная	4-опытная
Сенаж	17	4	4	4
Силос кукурузный	13	25	12	12
Сено люцерновое	2	2	2	2
Солома	-	1,2	2	3
Жом свекловичный	-	-	30	-
Барда пшеничная	-	-	-	33
Зерносмесь (пшеница, овес, ячмень)	5,5	6,0	6,0	6,0
Кукуруза плющенная	1,5	1,5	1,5	1,5
Шрот (подсолнечный+ рапсовый)	3,0	3,3	3,3	3,3
Декстроза	0,160	0,165	0,165	0,180
Премикс	0,130	0,130	0,140	0,140
Поваренная соль	0,120	0,120	0,120	0,120

В начале опыта среднесуточные удои во всех группах были практически одинаковые и составляли 30...31 кг. В дальнейшем в ходе лактации произошли изменения в величине их удоев. У коров первой группы, потреблявших полнорационную кормовую смесь на 5-м месяце лактации, удои были наиболее

высокими - 26,2 кг, а у коров третьей и четвертой групп произошло снижение продуктивности до 21,1...20,7 кг в сутки. Снижение удоев третьей и четвертой групп можно объяснить более низким содержанием крахмала, клетчатки и минеральных веществ в рационе (табл. 2).

Таблица 2. Основные характеристики рационов

Группа	Сух.в-о, кг	О.Э. МДЖ/кг СВ	Сыр. протеин (г/кг СВ)	Крахмал (г/кг СВ)	Сахар (г/кг СВ)	Клетчатка (г/кг СВ)	Кальций (г/кг СВ)	Фосфор (г/кг СВ)	Магний (г/кг СВ)	Калий (г/кг СВ)
1	20,6	10,8	157	171	106	206	8,01	3,80	3,70	11,2
2	20,6	10,8	151	171	105	193	8,00	3,81	3,70	11,3
3	20,7	10,7	154	165	105	191	7,91	3,77	3,68	11,1
4	20,7	10,8	155	165	104	190	7,90	3,74	3,69	10,1

В период научно-хозяйственного опыта наивысший удой 3950 кг получен в группе коров, потреблявших полнорационную кормовую смесь, что на 4,9 % ($P \geq 0,95$) больше, чем во второй группе и на 11,6 % (P

$\geq 0,999$) и 14,1 % ($P \geq 0,999$) в третьей и четвертой группах. Среднесуточный удой по первой группе составил 26,3 кг, во второй – 25,1 кг, в третьей – 23,6 кг и в четвертой – 23,1 кг (табл.3).

Таблица 3. Молочная продуктивность коров, ($X \pm Sx$)

Группа	Удой за 150 дней лактации, кг	МДЖ		МДБ	
		%	кг	%	кг
1	3950 $\pm$ 47,2	4,07 $\pm$ 0,03	160,4 $\pm$ 2,55	3,50 $\pm$ 0,02	138,2 $\pm$ 2,64
II	3765 $\pm$ 64,0*	4,06 $\pm$ 0,03	152,8 $\pm$ 3,21	3,48 $\pm$ 0,02	131,0 $\pm$ 3,30
III	3540 $\pm$ 63,8***	3,95 $\pm$ 0,03*	139,8 $\pm$ 3,25***	3,38 $\pm$ 0,02***	119,6 $\pm$ 3,41***
IV	3461 $\pm$ 55,4***	3,98 $\pm$ 0,03*	137,7 $\pm$ 3,40***	3,33 $\pm$ 0,03***	115,2 $\pm$ 3,30***

Примечание: * - $P \geq 0,95$; ** - $P \geq 0,99$; *** - $P \geq 0,999$

Больше жира и белка было в молоке первой группы 4,07 и 3,50 %, наименьшие показатели получены по группе коров с жомовым и бардяном типом кормления 3,95...3,98 % ($P \geq 0,95$) и 3,38...3,33 % ($P \geq 0,99$) соответственно. Аналогичная картина наблюдается и по молочному жиру и белку ($P \geq 0,999$) (табл.3).

Достигнутая высокая продуктивность, восстановление организма после отела и пиковой продуктивности говорят о высокой переваримости данных рационов.

Многочисленные данные отечественных ученых [13, 14, 15] показывают, что для получения качественного молока необходимы многокомпонентные рационы с включением в них сенажа, сена, силоса и концентратов, минеральных добавок. При включении в рацион коров большого количества какого-либо

одного вида корма может ухудшить вкус молока и его технологические свойства. Молоко коров при высоких дачах кормов отходов технического производства жомов, барды, пивной дробины и др. плохо сквашивается под воздействием сычужного фермента с образованием дряблого сгустка.

В наших опытах молоко коров, полученное от использования в кормлении полнорационной смеси, наиболее пригодно для производства твердых сыров. Время коагуляции белка и выпадение в осадок молока от коров, получавших полнорационную смесь, составила 27,3 мин. При том же технологическом процессе время коагуляции молока, полученного от коров, потребляющих силосный тип рациона, было дольше на 1,8 мин, при жомовом - на 5,1 мин и при бардяном - 5,8 мин.

4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные науки)

Молоко, полученное от коров, получавших жомовый и бардяной тип рациона, плохо свертывается молокосвертывающими ферментами, образуя дряблый сгусток, а полученное зерно из этого молока плохо обрабатывается, что говорит о малоприспособленности этого сырья для производства твердых сыров.

Качество молочного белка по сычужно-бродильной пробе у коров, получавших полнорационную

кормовую смесь, соответствует требованиям технического регламента. Класс молока по сычужно-бродильной пробе полностью подтверждает данные, представленные в таблице 4.

От молока коров, потреблявших полнорационную кормовую смесь, получен нормальный сгусток, что говорит о пригодности молока для производства твердых сычужных сыров.

Таблица 4. Сыропригодность молока коров

Показатель	Тип рациона			
	1-контроль	2-опытная	3-опытная	4-опытная
Продолжительность сычужной свертываемости, мин	31,2	33,4	38,3	39,2
Фаза коагуляции, мин	27,3	29,1,0	32,4	33,1
Фаза гелеобразования, мин	3,9	4,3	5,9	6,1
Класс молока по редуктазной пробе	II	II	II	II
Класс молока по бродильной пробе	II	III	III	III
Класс молока по сычужно-бро-дильной пробе	II	III	III	III
Термоустойчивость	II	II	III	III

Улучшая крупный рогатый скот по удою и содержанию жира в молоке, селекционеру важно знать, изменяется ли при этом содержание аминокислот, чтобы не ухудшить биологическую ценность белков молока.

На содержание аминокислот белка в молоке большое влияние оказывает уровень и тип кормления [16, 17, 18]. Для сравнительного изучения аминокислотного состава молока отбирали молоко от каждой группы подопытных коров при разных типах кормления (табл. 5).

Таблица 5. Содержание аминокислот в молоке коров, мг % (X±Sx)

Показатель	Тип кормления			
	1-контроль	2-опытная	3-опытная	4-опытная
Лизин	0,270±0,01	0,270±0,01	0,249±0,01	0,249±0,01
Гистидин	0,120±0,01	0,111±0,01	0,092±0,01	0,083±0,01
Аргинин	0,150±0,01	0,136±0,009	0,111±0,01	0,105±0,01
Треонин	0,158±0,01	0,139±0,009	0,128±0,009	0,122±0,01
Валин	0,200±0,01	0,196±0,01	0,184±0,01	0,167±0,009
Изолейцин	0,150±0,01	0,149±0,009	0,143±0,01	0,120±0,01
Лейцин	0,330±0,016	0,319±0,014	0,308±0,011	0,293±0,01
Фенилаланин	0,180±0,009	0,168±0,008	0,167±0,01	0,152±0,007
Незаменимые аминокислоты	1,558±0,04	1,488±0,02	1,382±0,02	1,291±0,03
Аспаргиновая кислота	0,260±0,02	0,259±0,015	0,251±0,02	0,242±0,014
Серин	0,171±0,01	0,169±0,01	0,162±0,01	0,159±0,01
Глутаминовая кислота	0,730±0,02	0,718±0,02	0,721±0,02	0,709±0,02
Пролин	0,330±0,02	0,337±0,02	0,322±0,02	0,313±0,018
Глицин	0,060±0,009	0,052±0,008	0,049±0,01	0,050±0,019
Аланин	0,110±0,01	0,102±0,01	0,095±0,01	0,084±0,01
Тирозин	0,180±0,01	0,178±0,01	0,171±0,01	0,173±0,01
Заменимые аминокислоты	1,841±0,05	1,815±0,04	1,771±0,03	1,730±0,04
Сумма всех аминокислот	3,399±0,06	3,303 ±0,04	3,153±0,04	3,021±0,05
I=E/N	0,846	0,820	0,780	0,746
I=E/T	0,458	0,450	0,438	0,427

Примечание: I=E/N – индекс биологической ценности молока (соотношение заменимых и незаменимых аминокислот); I=E/T – индекс биологической ценности молока (соотношение незаменимых аминокислот к сумме всех аминокислот)

В молоке коров, потреблявших полнорационную смесь, содержалось больше белка, чем при других типах кормления.

Содержание незаменимых аминокислот при потреблении полнорационной смеси выше, чем при силосном, бардяном и жомовом типах кормления, за

счет изолейцина, валина, гистидина и др. По заменимым аминокислотам при данном типе кормления повышение произошло за счет серина, аланина, тирозина и др.

Таким образом молоко, продуцируемое коровами, потреблявшими полнорационную смесь,

содержит больше аминокислот на 0,096 г/кг, чем при силосном на 0,246 г/кг, жомовом 0,246 и 0,378 г/кг – при бардяном типах кормления. Исследования также показали, что белки молока при потреблении полнорационной кормовой смеси более ценны. На это указывает индекс биологической ценности молока.

Данные исследований показывают, что молочный белок, синтезируемый животными красно-пестрой породы, потребляющих полнорационную смесь, характеризуется большей биологической ценностью $i=0,846$ и $i=0,458$. Биологическая ценность молочного белка, полученного от силосного типа рациона $i=0,820$ и $i=0,450$, от жомового типа составляет $i=0,780$ и 0,438, при бардяном $i=0,746$ и $i=0,427$.

Обсуждение

Полноценное и сбалансированное кормление положительно сказывается на молочной продуктивности и качественном составе молока (жир, белок, лактоза). В исследованиях Романова В.Н., Мишурова А. В. [13], В. А. Терещенко, Ю. Г. Любимовой, Е. А. Иванова [14] отмечается важность полноценного и разнообразного питания для достижения высокого уровня продуктивности и качества молока.

Важнейшим аспектом эксперимента стало изучение влияния кормов на способность молока формировать качественный сгусток при воздействии сычужного фермента. Buchner R.R., Delahoy J.E. [19], Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A. [20] отмечают, что полноценное кормление способствовало образованию нормального плотного сгустка, необходимого для успешного производства твердых сыров. Этот результат находит подтверждение и в наших исследованиях.

В исследованиях Н. А. Ткаченко, И. Ф. Горлова, М. И. Сложенкиной [16], Cannas A., Battaccone G., Nudda A. [17], А. П. Вельматова, А. А. Вельматова, А. М. Гурьянова [18] подробно изучались различия в аминокислотном составе молока в зависимости от типа кормов. Максимальное содержание незаменимых аминокислот наблюдалось у коров, получавших полноценный рацион, что отражает положительную роль сбалансированного питания в формировании аминокислотного профиля молока.

В наших исследованиях в период научно-хозяйственного опыта наивысший удой 3950 кг получен в группе коров, потреблявших полнорационную кормовую смесь, что на 4,9 % больше, чем во второй группе и на 11,6 % и 14,1 % в третьей и четвертой группах. Среднесуточный удой по первой группе составил 26,3 кг, во второй – 25,1 кг, в третьей – 23,6 кг и в четвертой – 23,1 кг.

Больше жира и белка в молоке было в первой группе 4,07 и 3,50 %, наименьшие показатели получены по группе коров с жомовым и бардяном типах кормления 3,95...3,98 % и 3,38...3,33 % соответственно.

Молоко коров, полученное от использования в кормлении полнорационной смеси, наиболее пригодно для производства твердых сыров.

От молока коров, потреблявших полнорационную кормовую смесь, получен нормальный сгусток, что говорит о пригодности молока для производства твердых сычужных сыров. Молоко коров, полученное от коров, потреблявших жомовый и бардяной типы рациона плохо свертывается свертывающими ферментами, образуя дряблый сгусток, а полученное зерно из этого молока плохо обрабатывается, остаточная сыворотка имела мутный вид, что говорит о малоприспособности этого сырья для производства твердых сыров. Молоко, продуцируемое коровами, потреблявшими полнорационную смесь, содержит больше аминокислот на 0,096 г/кг, чем при силосном на 0,246 г/кг, жомовом на 0,246 и 0,378 г/кг- при бардяном типах кормления. Исследования также показали, что белки молока при потреблении полнорационной кормовой смеси более ценны. Молочный белок, синтезируемый животными красно-пестрой породы, потреблявших полнорационную смесь, характеризуется большей биологической ценностью $i=0,846$ и $i=0,458$. Биологическая ценность молочного белка, полученного от силосного типа рациона, составляет $i=0,820$ и $i=0,450$, от жомового типа $i=0,780$ и 0,438, при бардяном типе $i=0,746$ и $i=0,427$.

Заключение

Проведенные исследования по технологическим свойствам молока, полученного от использования в кормлении полнорационной кормовой смеси, в сравнении с рационами силосного, жомового и бардяного типов является хорошим сырьем для молочной промышленности, из него можно вырабатывать твердые сычужные сыры.

Животные красно-пестрой породы, потребляющие полнорационную смесь, имеют наивысшую биологическую ценность молока, а использование жома свекловичного и барды несколько ухудшило его биологическую ценность. В связи с этим при производстве твердых сычужных сыров эту закономерность необходимо учитывать.

Литература

1. Федоренков В. Ф. Анализ состояния и перспективы улучшения генетического потенциала крупного рогатого скота молочных пород / В. Ф. Федоренков, Н.П. Мишуров, Т.Е. Маринченко и др.: научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех» 2019. 108 с.
2. Молочная продуктивность коров черно-пестрой породы и ее голштинизированных помесей разных поколений / П. С. Катмаков, А. В. Бушов, О. А. Десятов и др. // Селекционно-генетические и технологические аспекты инновационного развития животноводства: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию со дня рождения проф. Лебедево Е. Я. Брянск: ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, 2023. С. 71 – 78.
3. Попов Н. А., Галкин А. В. Методы выведения высокопродуктивного стада крупного рогатого скота

красно-пестрой породы ООО «Ермоловское». Подольск: ПФОП. 2022. 312 с.

4. Вельматов А. А. Формирование продуктивных и технологических качеств голштинизированного скота при разных уровнях кормления / Вельматов А. П., Гурьянов А. М., Тишкина Т.Н. и др. // Аграрный научный журнал, № 3. 2021. С. 53-57.

5. Карамаев С. В., Соболева Н. В., Карамаева А. С. Качество сыра при скормливании коровам сенажа из разных видов кормовых культур // Материалы научной конференции: Инновационные технологии и ветеринарная защита при интенсивном производстве продукции животноводства. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2016. С. 161-168.

6. Молочная продуктивность коров при включении в рацион консервированного сенажа / И. Ф. Вагатов, Ю. Ю. Брагина, Х. Х. Тагиров и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2024. №1. С. 46-48.

7. Влияние силосов из злаково-бобовых культур на молочную продуктивность коров в начале лактации / Б. Г. Шарифьянов, И. Ф. Юмагузин, Ф. М. Шагалиев и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2024. № 5. С. 54-57.

8. Тайны молочных рек. Практическое пособие. Том 1: Корма и кормление // Под общей редакцией А.М. Лопатко. Орел: ООО «Наша молодежь» ООО «Типография» Новое время», 2020. 564 с.

9. Современное состояние и перспективы разведения красно-пестрой породы в республике Мордовия / О. Н. Луконина, А. А. Вельматов, Т. Н. Тишкина и др. // Молочное и мясное скотоводство, 2022. №3. С. 17 – 20. doi: 10.33943/MMS.2022.11.35.004

10. Карамаев С. В., Соболева Н. В., Карамаева А. С. Влияние породы коров и сезона года на качество сыра // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти член-корреспондента РАН, проф. В.И. Левахина. Оренбург: ВНИИМС, 2017. С. 25-31.

11. Беликова В. С., Жукова Е. В., Пастух О. Н. Молочная продуктивность и технологические свойства молока при введении в рацион коров пробиотика «Байкал ЭМ-1» // Селекция, кормление, содержание сельскохозяйственных животных и технология производства продуктов животноводства. Московская область, Лесные поляны. 2008. С.18-21.

12. Скоркина И. А., Ламонов С. А., Ротов С. В. Хозяйственно-биологические особенности и технологические свойства молока и молочных продуктов красно-пестрой породы: монография. Воронеж: Мичуринский ГАУ, 2020. 91 с.

13. Романов В. Н., Мишуров А. В. Молочная продуктивность коров при скормливании разработанной «защищенной» формы холина // Молочное и мясное скотоводство. 2024. № 3. С. 52-55.

14. Влияние премиксов на основе лесной биомассы и природных минералов на технологические свойства молока / В. А. Терещенко, Ю. Г. Любимова, Е. А. Иванов и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2022. №3. С. 53 – 57.

15. Азоркина Е. В., Матюшкин В.Г., Пресняков А.Д. Цеолиты для улучшения аминокислотного состава молока // Комбикорма. 2009. № 5. С. 65-70.

16. Влияние новой кормовой добавки в рационе животных на аминокислотный состав молочных продуктов / Н. А. Ткаченко, И. Ф. Горлов, М. И. Сложенкина и др. // Молочное и мясное скотоводство. 2024. № 2. С. 39-42.

17. Cannas A., Battaccone G., Nudda A. Amino acid profile and technological properties of bovine milk as affected by feeding strategies // Animal Feed Science and Technology. 2020. Vol. 266. Article ID 114653. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114653

18. Аминокислотный состав молока коров-дочерей голштинских быков голландской селекции / А. П. Вельматов, А. А. Вельматов, А. М. Гурьянов и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока, Вып. 6 (25). 2011. С. 36-38.

19. Buchner R.R., Delahoy J.E. Influence of diet composition on milk yield and composition in dairy cows. Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. No. 2. P. 1154-1166. doi: 10.3168/jds.2019-17281

20. Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A. Effect of feed type on cheese-making properties of cow's milk. Lait. 2021. Vol. 101. No. 1. P. e1-e13. doi: 10.1051/lait/2020032

References

1. Fedorenkov V. F. Analysis of the state and prospects for improving the genetic potential of dairy cattle / V. F. Fedorenkov, N. P. Mishurov, T. E. Marinchenko, et al.: scientific analytical review. Moscow: Rosinformagrotech, 2019. 108 p.

2. Milk productivity of Black-and-White cows and their Holsteinized crossbreeds of different generations / P. S. Katmakov, A. V. Bushov, O. A. Desyatov, et al. // Breeding, genetic and technological aspects of innovative development of animal husbandry: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the birth of prof. Lebedko E. Ya. Bryansk: FGBOU VO Bryansk SAU, 2023. P. 71-78.

3. Popov N. A., Galkin A. V. Methods for breeding a highly productive herd of red-and-white cattle, Ermolovskoye LLC. Podolsk: PFOP. 2022. 312 p.

4. Velmatov A. A. Formation of productive and technological qualities of Holsteinized cattle at different feeding levels / Velmatov A. P., Guryanov A. M., Tishkina T. N., et al. // Agrarian scientific journal, No. 3. 2021. P. 53-57.

5. Karamaev S. V., Soboleva N. V., Karamaeva A. S. Cheese quality when feeding cows silage from different types of forage crops // Proceedings of the scientific conference: Innovative technologies and veterinary protection in intensive production of livestock products. Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2016. P. 161-168.

6. Milk productivity of cows when including canned silage in the diet / I. F. Vagapov, Yu. Yu. Bragina, Kh. Kh.

Tagirov et al. // Dairy and meat cattle breeding. 2024. No. 1. P. 46-48.

7. The effect of silages from cereal and legume crops on milk productivity of cows at the beginning of lactation / B. G. Sharifyanov, I. F. Yumaguzin, F. M. Shagaliev et al. // Dairy and meat cattle breeding. 2024. No. 5. P. 54-57.

8. Secrets of Milk Rivers. A Practical Guide. Volume 1: Feed and Feeding // General editorship of A.M. Lopatko. Orel: OOO Nasha Molodezh, OOO Typography, Novoye Vremya, 2020. 564 p.

9. Current Status and Prospects for Breeding the Red-Pied Breed in the Republic of Mordovia / O. N. Lukonina, A. A. Velmatov, T. N. Tishkina, et al. // Dairy and Meat Cattle Breeding, 2022. No. 3. P. 17-20. doi: 10.33943/MMS.2022.11.35.004

10. Karamaev S. V., Soboleva N. V., Karamaeva A. S. Influence of cow breed and season of the year on cheese quality // Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, prof. V. I. Levakhin. Orenburg: VNIIMS, 2017. P. 25-31.

11. Belikova V. S., Zhukova E. V., Pastukh O. N. Milk productivity and technological properties of milk when introducing the probiotic "Baikal EM-1" into the diet of cows // Selection, feeding, keeping of farm animals and technology of livestock product production. Moscow region, Lesnye Polyany. 2008. P. 18-21.

12. Skorkina I. A., Lamonov S. A., Rotov S. V. Economic and biological characteristics and technological properties of milk and dairy products of the Red-Pied breed: monograph. Voronezh: Michurinsky State Agrarian University, 2020. 91 p.

13. Romanov V. N., Mishurov A. V. Milk productivity of cows when feeding the developed "protected" form of choline // Dairy and meat cattle breeding. 2024. No. 3. P. 52-55.

14. Influence of premixes based on forest biomass and natural minerals on the technological properties of milk / V. A. Tereshchenko, Yu. G. Lyubimova, E. A. Ivanov, et al. // Dairy and meat cattle breeding. 2022. No. 3. P. 53-57.

15. Azorkina E. V., Matyushkin V. G., Presnyakov A. D. Zeolites for improving the amino acid composition of milk // Kombikorma. 2009. No. 5. P. 65-70.

16. The influence of a new feed additive in animal diets on the amino acid composition of dairy products / N. A. Tkachenkova, I. F. Gorlov, M. I. Slozhenkina, et al. // Dairy and beef cattle breeding. 2024. No. 2. P. 39-42.

17. Cannas A., Battacone G., Nudda A. Amino acid profile and technological properties of bovine milk as affected by feeding strategies // Animal Feed Science and Technology. 2020. Vol. 266. Article ID 114653. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114653

18. Amino acid composition of milk of cows-daughters of Holstein bulls of Dutch selection / A. P. Velmatov, A. A. Velmatov, A. M. Guryanov, et al. // Agrarian science of the Euro-North-East, Issue 6 (25). 2011. P. 36-38.

19. Buchner R.R., Delahoy J.E. Influence of diet composition on milk yield and composition in dairy cows. Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. No. 2. P. 1154-1166. doi: 10.3168/jds.2019-17281

20. Chilliard Y., Glasser F., Ferlay A. Effect of feed type on cheese-making properties of cow's milk. Lait. 2021. Vol. 101. No. 1. P. e1-e13. doi: 10.1051/lait/2020032

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

УДК 664.769: 66.011

Моделирование и оптимизация воздействия вакуума на степень расширения зернового экструдата**А. А. Курочкин**✉, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»**Д. И. Фролов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые производства»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

440039, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11

✉ anatolii_kuro@mail.ru

Резюме. В работе исследовано влияние параметров вакуумной обработки – давления (10...50 кПа) и времени экспозиции (0...10 с) на коэффициент расширения зернового крахмального экструдата. Использована разработанная авторами экспериментальная установка на базе модернизированного экструдера ЭК-40 с интегрированной вакуумной камерой и физическая модель, полученная с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, учитывающая транспорт газа через пористую среду (закон Дарси), вязкоупругую деформацию твёрдого каркаса и геометрическое расширение продукта. Установлено, что максимальный коэффициент расширения (2,8...2,9) достигается при давлении 10 кПа и времени воздействия 1,1...1,2 с. При снижении давления ниже 8...10 кПа наблюдается эффект насыщения, обусловленный механическими ограничениями крахмального каркаса. Оптимальное время экспозиции, соответствующее 95 % от максимального расширения экструдата, составляет 1,0...1,1 с и слабо зависит от уровня вакуума. Модель верифицирована экспериментально: отклонение расчётных и измеренных значений не превышает 4 %. Результаты позволяют оптимизировать режимы термовакуумной экструзии и создают основу для цифрового проектирования подобных процессов в технологиях кормоприготовления и производства пищевых продуктов.

Ключевые слова: экструдер, термовакуумная экструзия, моделирование, коэффициент расширения, численное моделирование, вакуум.

Для цитирования: Курочкин А. А., Фролов Д. И. Моделирование и оптимизация воздействия вакуума на степень расширения зернового экструдата // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 158-165. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

Modeling and improvement of the vacuum effect on the expansion ratio of grain extrudate**A. A. Kurochkin**✉, **D. I. Frolov**

Penza State Technological University

440039, Penza, Baidukova drive / Gagarin str., 1a/11

✉ anatolii_kuro@mail.ru

Abstract. This study investigated the influence of vacuum processing parameters – pressure (10–50 kPa) and exposure time (0–10 s) – on the expansion coefficient of a starch grain extrudate. The authors used an experimental setup, based on a modernized EK-40 extruder with an integrated vacuum chamber, and a physical model obtained using the COMSOL Multiphysics software package. This model takes into account gas transport through a porous medium (Darcy's law), viscoelastic deformation of the solid framework and geometric expansion of the product. It was found that the maximum expansion coefficient (2.8–2.9) is achieved at a pressure of 10 kPa and an exposure time of 1.1–1.2 s. When the pressure decreases below 8–10 kPa, a saturation effect is observed, caused by mechanical limitations of the starch framework. Appropriate exposure time corresponding to 95% of maximum expansion the extrudate velocity is 1.0–1.1 s and depends weakly on the vacuum level. The model has been verified experimentally: the deviation between the calculated and measured values does not exceed 4%. The results enable improvement of thermal vacuum extrusion modes and form the basis for digital design of similar processes in feed preparation and food production technologies.

Keywords: extruder, thermal vacuum extrusion, modeling, expansion coefficient, numerical simulation, vacuum.

For citation: Kurochkin A. A., Frolov D. I. Modeling and improvement of the vacuum effect on the expansion ratio of grain extrudate // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 158-165 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

Введение

В последние годы процессы экструзии сельскохозяйственного сырья стали одной из ключевых составляющих технологий в кормоприготовлении и производстве пищевых продуктов [1]. В процессе

экструдирования сырьё подвергается значительным деформациям сдвига, высоким температурам и давлениям, что приводит к смешению компонентов, желатинизации крахмала, денатурации белков и ряду других физико-химических преобразований,

определяющих свойства конечного продукта [2, 3]. Особый интерес представляют расширенные зерновые экструдаты, которые широко применяют при производстве кормов для животных, а также завтраков, снеков и других функциональных продуктов для людей [4]. Коэффициент расширения таких продуктов при экструзии является важнейшим показателем качества, так как он определяет пористость, хрусткость и усвояемость материала [5].

Традиционный способ достижения рационального расширения сырья в процессе обработки основан на резком снижении давления при выходе его из фильеры матрицы машины [6, 7]. Однако этот метод требует строгого контроля температуры и влажности сырья, что ограничивает технологические возможности экструзии [8, 9]. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование термовакуумного эффекта [10]. При снижении давления в вакуумной камере, установленной на выходе сырья из фильеры, происходит интенсивное испарение влаги, что обеспечивает формирование развитой пористой структуры при относительно мягких температурных условиях [11]. На рисунке 1 представлена модель экспериментальной установки: термовакуумный экструдер на базе модернизированного одношнекового экструдера ЭК-40 с интегрированной вакуумной камерой, разработанной авторами.

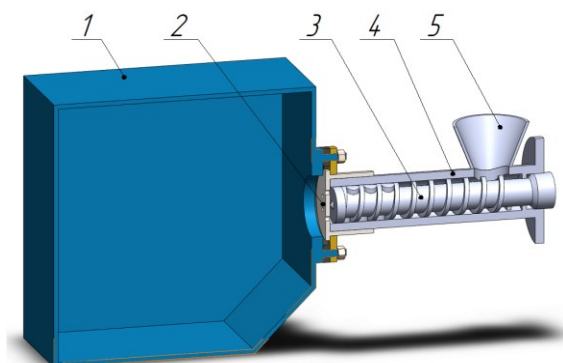


Рис. 1. Схема одношнекового экструдера с вакуумной камерой: 1 – вакуумная камера; 2 – матрица; 3 – шнек; 4 – корпус; 5 – горловина

Несмотря на очевидные преимущества вакуумного способа, количественное понимание влияния уровня вакуума и времени его воздействия на коэффициент расширения (КР) экструдатов остаётся недостаточно изученным. Большинство исследований посвящено эмпирическим зависимостям КР от состава смеси или параметров экструдера и не рассматривает вакуум как независимый параметр с точки зрения механики порозластичной деформации и транспорта газов [12, 13, 14, 15, 16].

Цель работы заключается в разработке и верификации мультифизической модели расширения зерновых экструдатов при контролируемом вакууме, а также в установлении количественных зависимостей между коэффициентом расширения, уровнем вакуума и временем воздействия.

Задачей исследования являлся численный анализ процесса расширения экструдата с вариацией уровня вакуума в камере и времени воздействия, проведенный на платформе COMSOL Multiphysics, и сравнение результатов исследований с экспериментальными данными, полученными на собственной установке.

Материалы и методы

1) Экспериментальная установка и материалы

В исследованиях использовали зерновой экструдат на основе пшеничного крахмала с начальной влажностью 16...18 %. Экспериментальные исследования по экструзии проводили на модернизированном одношнековом экструдере ЭК-40 производительностью 40 кг/ч, оснащённом вакуумной камерой, установленной непосредственно на выходе фильеры (рис. 2).



Рис. 2. Модернизированный одношнековый экструдер ЭК-40 с вакуумной камерой

Вакуумная камера представляет собой герметичный цилиндрический корпус из нержавеющей стали диаметром 300 мм и длиной 400 мм, оснащённый регулируемым клапаном для точного поддержания заданного уровня давления (5...50 кПа); системой управления временем экспозиции (0,5...10 с) с помощью пневматического затвора на выходе.

Давление в камере контролировали с помощью цифрового вакуумметра с погрешностью измерений $\pm 0,5$ кПа. Экструдат после вакуумной обработки охлаждали до комнатной температуры и хранили в герметичной упаковке до анализа.

2) Определение коэффициента расширения

Коэффициент расширения КР рассчитывали как отношение объёма экструдата после обработки $V_{\text{ЭКСТР}}$ к объёму V_0 , соответствующему сечению фильеры:

$$КР = \frac{V_{\text{ЭКСТР}}}{V_0} = \frac{m / \rho_{\text{нас}}}{\pi r_f^2 L}, \quad (1)$$

где m – масса образца, кг; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность экструдата, измеренная методом объёмного

вытеснения (по ГОСТу 31819-2012), кг/м^3 ; r_f – радиус фильеры, м; L – длина отрезка экструдата, м.

Измерения проводили в трёхкратной повторности. Погрешность определения КР не превышала $\pm 3\%$.

3) Численное моделирование

Численное моделирование процесса расширения экструдата под действием вакуума выполнено в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием связанных физических интерфейсов: Darcy's Law – для описания транспорта газа (воздуха и пара) через пористую структуру; Solid Mechanics – для моделирования вязкоупругой деформации твёрдого каркаса крахмала; Deformed Geometry – для учёта геометрического расширения.

Геометрическая модель представляла собой осесимметричный цилиндр диаметром 5 мм и длиной 10 мм, соответствующий сечению экструдата на выходе из фильеры.

Начальные условия: поровое давление в экструдате – атмосферное $p_0 = 101325$ Па; температура – 105°C ; давление насыщенного пара $p_{sat} = 120$ кПа.

Граничные условия: на внешней поверхности – мгновенное снижение давления до заданного уровня вакуума (10...50 кПа); на оси симметрии – условия симметрии (рис. 3).

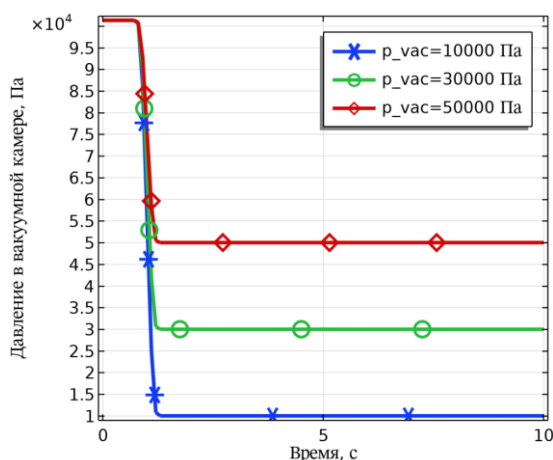


Рис. 3. Зависимость давления в вакуумной камере от времени

Материал экструдата задавали как пористую вязкоупругую среду со следующими свойствами: плотность – 1300 кг/м^3 ; модуль упругости – 1 МПа ; коэффициент Пуассона – $0,35$; пористость $\epsilon = 0,6$; проницаемость $k = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, динамическая вязкость $\mu = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Коэффициент расширения в модели определяли как отношение текущего объема тела вращения к начальному.

Параметрический анализ проводили по двум факторам: давление вакуума $p_{vac} = 10, 30, 50$ кПа; время экспозиции t – от 0 с до 10 с.

Сетка конечных элементов состояла из 492 треугольных элементов, а относительная погрешность решения не превышала 1% .

Для описания транспорта газа через пористую среду используют закон Дарси с возможным источником (от испарения влаги):

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\epsilon k}{\mu} \nabla p \right) + Q = 0, \quad (2)$$

где ϵ – пористость; k – проницаемость пористой среды, м^2 ; μ – динамическая вязкость газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$; p – поровое давление, Па; Q – объёмный источник газа, с^{-1} (при моделировании испарения $Q = k_{evap} (p_{sat} - p)$ при $p < p_{sat}$).

Общее напряжённое состояние в вязкоупругом материале выражают через эффективное напряжение:

$$\sigma = C : \epsilon - \alpha p \mathbf{I}, \quad (3)$$

где σ – тензор напряжений, Па; C – тензор упругих модулей, Па; ϵ – тензор малых деформаций; α – коэффициент (для открытых пор $\alpha \approx 1$); p – поровое давление, Па; $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

Для вязкоупругого поведения (стандартная линейная модель) модуль упругости

$$E(t) = E_{\infty} + E_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (4)$$

где E_{∞} – равновесный модуль упругости, Па;

E_1 – модуль релаксации, Па; τ_1 – время релаксации, с.

Геометрическое расширение моделируется путём деформации сетки, которая следует за перемещением материала. Узловые координаты сетки определяют как:

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{d}, \quad (5)$$

где $\mathbf{X}$ – исходные (лагранжевы) координаты, м; $\mathbf{d} = (d_r, d_z)$ – вектор перемещения сетки, м.

В осесимметричной постановке компоненты перемещения задаются на основе решения механики: $d_r = u_r$, $d_z = u_z$. где u_r и u_z – радиальная и осевая компоненты перемещения из решения задачи Solid Mechanics.

Результаты

Анализ поля эквивалентных напряжений по критерию фон Мизеса (σ_{vM} , Па) позволил оценить механическую нагрузку, испытываемую твёрдым каркасом крахмала в процессе расширения под действием вакуума. На рисунке 4 представлено пространственное распределение σ_{vM} в поперечном сечении экструдата через $0,1$ с после начала вакуумирования при давлении 10 кПа. Видно, что максимальные напряжения сосредоточены в поверхностных слоях и в зонах перехода от центральной части к периферии, где наблюдается наибольший градиент деформации. Это согласуется с физикой процесса: внешние слои материала первыми подвергаются растягивающим усилиям из-за быстрого снижения давления на границе,

в то время как центральная часть остаётся относительно сжатой до тех пор, пока газ не успеет выйти из глубинных пор.

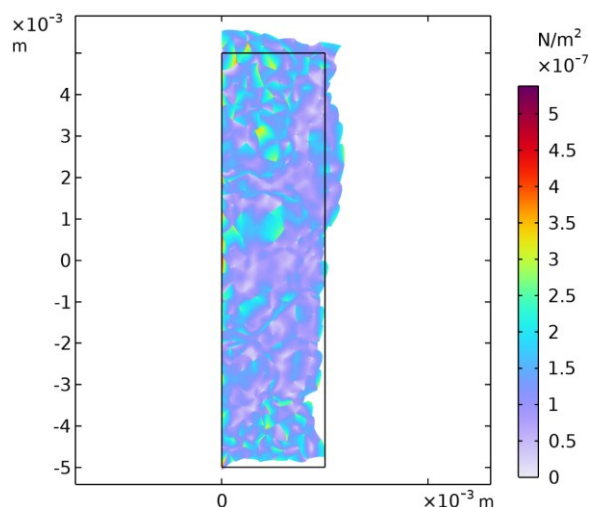


Рис. 4. Поле эквивалентных напряжений по критерию фон Мизеса

Максимальные напряжения в начальный момент времени (0,1...0,2 с) достигают 0,2...0,5 МПа, что существенно ниже предела прочности крахмальных пен (обычно 5...15 МПа), что объясняет стабильность структуры без разрушения во время расширения. При этом напряжения имеют выраженный осесимметричный характер, что соответствует равномерному радиальному расширению экструдата. С течением времени (до 4...5 с) поле напряжений становится более однородным, поскольку давление выравнивается по объёму, а материал переходит в состояние упругопластического равновесия.

Такое распределение напряжений подтверждает важность учёта вязкоупругих свойств материала в модели: именно способность к временной деформации и релаксации позволяет материалу «расправиться» без разрушения, обеспечивая высокий коэффициент расширения. Полученные данные также могут быть использованы для прогнозирования локальных зон потенциального разрушения при чрезмерном вакуумировании или неравномерной геометрии фильеры.

Форма и степень расширения зернового экструдата, полученного в эксперименте, имеют высокую степень соответствия этим параметрам, предсказанным численной моделью при фиксированном режиме вакуумной обработки (давление 10 кПа, время экспозиции 4 с).

Визуально форма расширенного экструдата, включая характерную бочкообразную геометрию и однородность поверхности, совпадает как в физическом образце, так и в образце, полученном в результате моделирования. Количественно коэффициент расширения составил $2,7 \pm 0,2$ в эксперименте и $2,8 \pm 0,2$ в модели (относительное отклонение менее 3...4 %). Такое хорошее согласие подтверждает, что разработанная мультифизическая модель адекватно

описывает ключевые процессы – транспорт газа через пористую структуру, вязкоупругую деформацию крахмального каркаса и геометрическое расширение материала под действием вакуума.

На рисунке 5 представлены зависимости коэффициента расширения экструдата от времени воздействия вакуума при постоянном давлении в камере (10, 30 и 50 кПа). Анализ кривых показывает, что во всех режимах наблюдается характерная динамика: быстрый рост коэффициента расширения в первые 1...2 с после начала вакуумирования, сопровождающийся интенсивным выходом газа из пористой структуры, за которым следует постепенное замедление темпов расширения и выход на плато, свидетельствующее о выравнивании порового давления по объёму материала. Максимальный коэффициент расширения достигается при времени экспозиции 4...5 с, после чего дальнейшее увеличение времени не приводит к значимому росту КР.

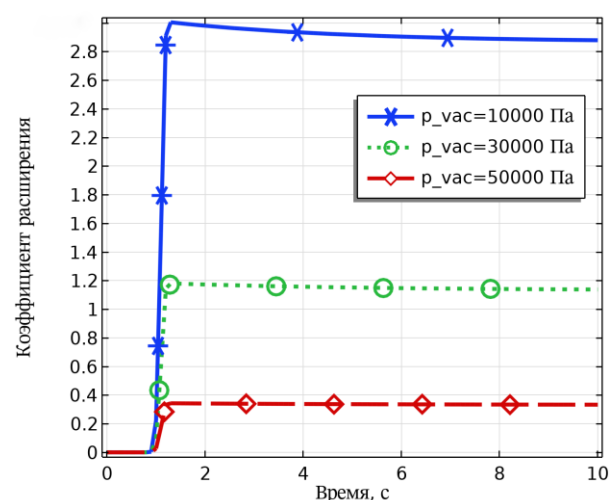


Рис. 5. Зависимости коэффициента расширения экструдата от времени воздействия вакуума при постоянном давлении в камере (10, 30 и 50 кПа)

Оптимальное время воздействия вакуума определено как момент достижения 95 % от максимального значения коэффициента расширения. Для давления 10 кПа это время составляет 1,1 с, для 30 кПа и 50 кПа – 1,0 с. Такая тенденция обусловлена ускорением процесса выравнивания давления при более высоком вакууме: чем ниже абсолютное давление в камере, тем интенсивнее градиент давления на границе, и тем быстрее газ покидает материал.

Данные численного моделирования, отражающие пространственно-временную эволюцию порового давления, подтверждают этот механизм: фронт снижения давления распространяется от поверхности к центру экструдата, а скорость снижения давления зависит от разницы между внешним вакуумом и начальным давлением внутри пор. Таким образом, оптимальное время экспозиции является компромиссом между полнотой расширения и производительностью процесса. Несмотря на различия в величинах приложенного вакуума, время достижения

установившегося значения коэффициента расширения оказывается почти одинаковым (около 1 с) для всех исследованных давлений. Это связано с тем, что ограничивающим фактором процесса расширения является скорость выхода газа из внутренних замкнутых пор, а перепад давления как таковой.

На рисунке 6 представлена зависимость максимального коэффициента расширения КР от абсолютного давления в вакуумной камере при различном времени экспозиции. Анализ данных показывает чёткую нелинейную зависимость: с уменьшением давления вакуума от 50 кПа до 10 кПа КР возрастает – от 0 до 2,8. Это объясняется увеличением движущей силы процесса – перепада давления между внутренним поровым пространством экструдата и внешней средой, что способствует более интенсивному выходу газа и формированию развитой пористой структуры.

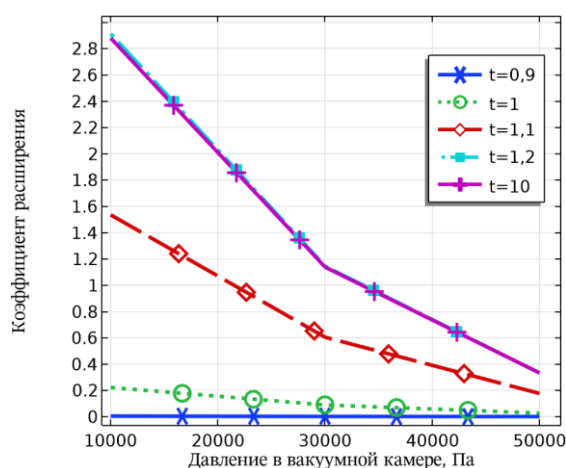


Рис. 6. Зависимость максимального коэффициента расширения КР от давления в вакуумной камере

Максимальный коэффициент расширения наблюдается при давлении 10 кПа и времени экспозиции 1,1...1,2 с. Однако при дальнейшем снижении давления ниже 8...10 кПа наблюдается явление насыщения: дальнейшее понижение давления практически не приводит к увеличению КР. Такая закономерность обусловлена тем, что при давлении ниже 8 кПа разница между давлением насыщенного пара воды (при 105 °С – около 120 кПа) и внешним давлением становится настолько большой, что испарение влаги происходит почти мгновенно, а структурная прочность крахмального каркаса начинает ограничивать возможность его дальнейшего расширения. Таким образом, снижение давления ниже 8...10 кПа является технологически неэффективным, поскольку не даёт существенного прироста качества продукта, но требует дополнительных энергетических затрат.

Полученные численные результаты подтверждены экспериментальными данными, полученными на модернизированном одношнековом экструдере с вакуумной камерой (рис. 7).

Выявленное оптимальное время экспозиции (1,1...1,2 с в зависимости от давления) имеет важное практическое значение. С одной стороны, за малое время не достигается максимальное расширение; с другой – чрезмерно длительная обработка не только неэффективна, но и может привести к охлаждению продукта и снижению качества текстуры. Оптимальный режим ($p_{vac} = 10$ кПа, $t = 1,1...1,2$ с) позволяет достичь максимального коэффициента расширения (~2,8) при минимальных энергозатратах, что особенно актуально при масштабировании технологии.

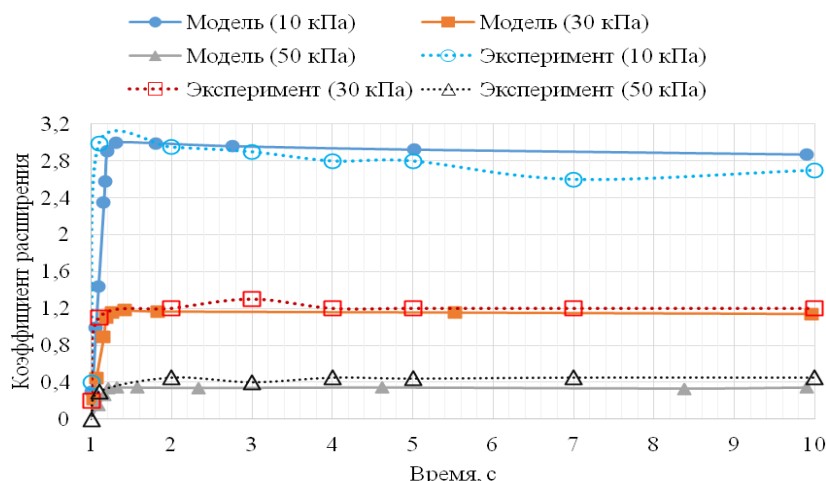


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и теоретических данных коэффициента расширения экструдата от времени вакуума при разных давлениях в вакуумной камере

Полученные результаты демонстрируют, что вакуумная обработка на выходе из фильеры является эффективным инструментом управления структурой и степенью расширения зернового экструдата.

Установленная нелинейная зависимость коэффициента расширения от уровня вакуума согласуется с физическими представлениями о пределах газовой выделении и механической прочности пористого каркаса.

Эти данные дополняют и уточняют ранее опубликованные эмпирические зависимости, которые, как правило, ограничиваются диапазоном атмосферного давления или слабого вакуума и не учитывают динамику процесса [17, 18].

Обсуждение

Сравнение полученных данных с литературными источниками подтверждает общую тенденцию роста коэффициента расширения при снижении давления в диапазоне 10...50 кПа [1, 2]. Однако многие авторы ограничиваются этим диапазоном и не исследуют область глубокого вакуума (<10 кПа), где мы выявили эффект насыщения расширения. В отличие от традиционного объяснения лимита расширения исчерпанием влаги для парообразования, наша модель показывает, что при давлении ниже 8...10 кПа расширение ограничивается механической устойчивостью формирующегося крахмального каркаса. Расчётные максимальные напряжения (0,2...0,5 МПа) остаются в 10...30 раз ниже предела прочности крахмальных пен (5...15 МПа) [17, 18], что обеспечивает структурную целостность, но одновременно определяет физический предел расширения.

Определение оптимального времени экспозиции (1,1...1,2 с для достижения 95 % максимального расширения) дополняет преимущественно статические подходы к описанию вспенивания [19], вводя кинетический аспект, критически важный для промышленной реализации. Разработанная модель демонстрирует высокую прогностическую способность. Ключевое преимущество подхода – количественная связь внешних технологических параметров (давление, время) с внутренними физическими полями (поровое давление, напряжения в каркасе) при сохранении расчётной эффективности за счёт отказа от избыточной детализации (например, моделирования роста отдельных пузырьков).

Практическая значимость режима 10 кПа / 1,1...1,2 с подтверждается сравнением с экспериментальными данными, полученными на модернизированном одношнековом экструдере с вакуумной камерой [11]. Предложенный режим обеспечивает коэффициент расширения 2,8...2,9 при минимизации энергозатрат на вакуумирование без риска разрушения структуры обрабатываемого продукта.

Заключение

Коэффициент расширения экструдата возрастает с уменьшением давления в вакуумной камере, однако при значениях ниже 8...10 кПа наблюдается эффект насыщения, обусловленный ограничением по механическим свойствам твёрдого каркаса материала. Оптимальное время воздействия вакуума, обеспечивающее достижение 95 % от максимального расширения экструдата, составляет 1,1...1,2 с в зависимости от давления.

Разработанная численная модель, учитывающая связь порового давления, вязкоупругой деформации и геометрического расширения, хорошо согласуется с экспериментальными данными (отклонение менее

4 %), что подтверждает её прогностическую способность. На основе комплексного анализа предложены технологически эффективные режимы вакуумной обработки: давление 10 кПа при времени экспозиции 1,1...1,2 с, позволяющем достичь максимального коэффициента расширения 2,8...2,9 без избыточных энергозатрат.

Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение, так как раскрывают физические механизмы вакуумного вспенивания экструдатов и предоставляют инженерные рекомендации для оптимизации процессов производства вспененных кормовых и пищевых продуктов на основе зернового сырья.

Литература

1. Аксенова О. И., Алексеев Г. В., Маслова К. С. Основные тенденции развития экструзионной техники и технологии // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Бийск, 22–24 мая 2019 г.). Бийск: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2019. С. 589-592.
2. Бахчевников О. Н., Брагинцев С. В. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 690-706.
3. Шариков А. Ю., Степанов В. И., Иванов В. В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 447-460.
4. Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А. Влияние термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства получаемого продукта // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4. С. 37-46.
5. Влияние дозировки клетчатки топинамбура, продукта комплексной технологии спирта, на изменение свойств рисовых экструдатов / М. В. Амелякина, В. А. Федотов, Н. В. Короткова и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 4. С. 20-27.
6. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // Food and Bioprocess Technology. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 186-193.
7. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process // Journal of Food Engineering. 2003. Vol. 60. No. 2. P. 185-192.
8. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical reviews in food science and nutrition. 2019. Vol. 59. No. 18. С. 2979-2998.
9. Rokey G. J., Plattner B., Souza E. M. Feed extrusion process description // Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Т. 39. С. 510-518.

10. Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, П. К. Гарькина и др. // *Нива Поволжья*. 2019. № 2 (51). С. 134-143.

11. Kurochkin A. A., Frolov D. I., Zimnyakov V. M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Т. 640. № 7. С. 072018.

12. Аксенова О. И. Эмпирическое исследование кинетических зависимостей экструдирования рыбо-растительной смеси для производства расширенных картофельных снеков // *Ползуновский вестник*. 2018. № 3. С. 3-9.

13. Математическое обеспечение процесса экструдирования аномально-вязких сред методами планирования эксперимента / В. Н. Василенко, М. В. Копылов, А. А. Дерканосова и др. // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. № 3 (77). С. 37-42.

14. Курочкин А. А., Фролов Д. И. Влияние размерных характеристик матрицы экструдера на свойства получаемого экструдата // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. Т. 7. № 1. С. 28-37.

15. Потапов М. А., Фролов Д. И., Курочкин А. А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. Т. 5. № 4. С. 42-48.

16. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review / M. S. Alam, J. Kaur, H. Khaira, et al. // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2016. Vol. 56. No. 3. С. 445-473.

17. Modeling of starchy melts expansion by extrusion / M. Kristiawan, G. Della Valle, V. K. Kansou et al. // *Trends in food science & technology*. 2016. Vol. 48. P. 13-26.

18. Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // *Extrusion cooking*. Woodhead Publishing, 2020. P. 179-204.

19. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack / X. Meng, M. Threinen, M. Hansen et al. // *Food Research International*. 2010. Т. 43. No. 2. С. 650-658.

References

1. Aksenova, O. I., Alekseev, G. V., Maslova, K. S. "Main Trends in the Development of Extrusion Equipment and Technology" // "Technologies and Equipment for the Chemical, Biotechnological, and Food Industries: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists with International Participation" (Biysk, May 22-24, 2019). Biysk: Altai State Technical University named after I. I. Polzunov, 2019. pp. 589-592.

2. Bakhchevnikov, O. N., Braginet, S. V. "Extrusion of Plant-Based Food Raw Materials (Review)" // "Food Production Equipment and Technology." 2020. Vol. 50, No. 4. P. 690-706.

3. Sharikov A. Yu., Stepanov V. I., Ivanov V. V. Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes // *Bulletin of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2019. Vol. 9. No. 3 (30). P. 447-460.

4. Frolov D. I., Kurochkin A. A., Potapov M. A. Influence of thermal vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the resulting product // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*. 2024. No. 4. P. 37-46.

5. Influence of the dosage of Jerusalem artichoke fiber, a product of complex alcohol technology, on the change in the properties of rice extrudates / M. V. Amelyakina, V. A. Fedotov, N. V. Korotkova, et al. // *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. Т. 85. No. 4. P. 20-27.

6. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // *Food and Bioprocess Technology*. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 186-193.

7. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process // *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 60. No. 2. P. 185-192.

8. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. Vol. 59. No. 18. P. 2979-2998.

9. Rokey G. J., Plattner B., Souza E. M. Feed extrusion process description // *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2010. Vol. 39. P. 510-518.

10. Improving the efficiency of extrudate dewatering in the vacuum chamber of a modernized extruder / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, P. K. Garkina, et al. // *Niva Povolzhya*. 2019. No. 2 (51). P. 134-143.

11. Kurochkin A. A., Frolov D. I., Zimnyakov V. M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 640. No. 7. P. 072018.

12. Aksenova O. I. Empirical study of the kinetic dependencies of extrusion of a fish-vegetable mixture for the production of expanded potato snacks // *Polzunovsky Vestnik*. 2018. No. 3. P. 3-9.

13. Mathematical support for the process of extrusion of anomalously viscous media using experimental design methods / V. N. Vasilenko, M. V. Kopylov, A. A. Derkanosova, et al. // *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol. 80. No. 3 (77). P. 37-42.

14. Kurochkin A. A., Frolov D. I. Influence of the dimensional characteristics of the extruder die on the properties of the resulting extrudate // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*. 2022. Vol. 7. No. 1. P. 28-37.

15. Potapov M. A., Frolov D. I., Kurochkin A. A. Optimization of the number of holes in the die of a single-screw extruder for processing poultry manure // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2020. Vol. 5. No. 4. P. 42–48.

16. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review / M. S. Alam, J. Kaur, H. Khaira, et al. // Critical reviews in food science and nutrition. 2016. Vol. 56.No. 3. P. 445-473.

17. Modeling of starchy melts expansion by extrusion / M. Kristiawan, G. Della Valle, V. K. Kansou et al. // Trends in food science & technology. 2016. Vol. 48. P. 13-26.

18. Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // Extrusion cooking. Woodhead Publishing, 2020. P. 179-204.

19. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack / X. Meng, M. Threinen, M. Hansen et al. // Food Research International. 2010. T. 43. No. 2. P. 650-658.

Цифровой двойник пневматической системы посевного комплекса на основе сопряжённого CFD-DEM моделирования

С. Г. Мударисов✉, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

И. М. Фархутдинов, доктор технических наук, доцент кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

В. Х. Имангулов, младший научный сотрудник кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

Р. Т. Гареев, соискатель кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34

✉salavam@gmail.com

Резюме. Равномерность распределения семян в пневматических системах напрямую определяет эффективность использования широкозахватных посевных комплексов, однако именно при движении семян через распределительную головку наблюдаются явления, приводящие к наибольшему снижению точности высева. В статье предлагается подход, в котором аэродинамика двухфазного потока «воздух – семена пшеницы» рассматривается не абстрактно, а через заранее идентифицированный режим течения: по результатам экспериментальных измерений массовой концентрации, равной 0,33, скоростей семян в пределах 1,7...1,95 м/с и межфазного числа Рейнольдса $Re_p \approx (5,3...5,9) \cdot 10^3$ с использованием штатных узлов посевного комплекса John Deere 1910. Такой поток отнесён к сильно запылённым турбулентным течениям с автомодельным режимом обтекания частиц. Это позволило обосновать выбор стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности и постоянного коэффициента сопротивления частиц $C_D = 0,424$ как базиса для построения сопряжённой CFD-DEM-модели. Численный эксперимент выполнен с модернизированной вертикальной распределительной головкой с девятью выходами, в которой роль стабилизирующего элемента играет внутренняя спиральная вставка треугольного поперечного сечения в нагнетательную трубу распределителя. Варьируя геометрию спирали по трём параметрам (углу при основании треугольного поперечного сечения витка спирали α , количеству витков n и высоте сечения спирали h), исследовано распределение семенного потока как отклик сложной газодинамико-частичной системы, а не как набор локальных эмпирических коэффициентов. Поверхность отклика коэффициента вариации показывает, что именно высота сечения спирали формирует область оптимальных режимов, что позволяет существенно снизить неравномерность распределения семян при рабочих скоростях, характерных для современных посевных агрегатов. Такой формат цифрового эксперимента превращает CFD-DEM-модель в практический инструмент конструирования распределительных устройств нового поколения.

Ключевые слова: равномерность, распределение, семена, семяпровод, посевной комплекс, пневматическая система, вертикальный распределитель, гидродинамика, метод дискретных элементов, CFD-DEM моделирование, воздушно-зерновая смесь.

Для цитирования: Цифровой двойник пневматической системы посевного комплекса на основе сопряжённого CFD-DEM моделирования С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов, Р. Т. Гареев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 166-176. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-166-176

A digital twin of a seeding complex pneumatic system based on coupled cfd-dem modeling

S.G. Mudarisov, I.M. Farkhutdinov, V.Kh. Imangulov, R.T. Gareev

FSBEI HE Bashkir State Agrarian University

450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34

✉salavam@gmail.com

Abstract. The uniformity of seed distribution in pneumatic systems directly determines the efficiency of wide-cut seeding complexes. However, phenomena leading to the greatest reduction in seeding accuracy are observed particularly during the seed movement through the distribution head. The article proposes an approach in which the aerodynamics of a two-phase air-wheat seed flow is considered not in the abstract, but through a pre-identified flow regime. It is based on the results of experimental measurements of a mass concentration of 0.33, seed velocities in the range of 1.7...1.95 m/s and an interfacial Reynolds number $Re_p \approx (5.3...5.9) \cdot 10^3$ using standard units of a John Deere 1910 seeding complex. This flow is classified as a highly dusty turbulent flow with a self-similar flow regime around particles. This enables to justify the choice of the standard $k-\epsilon$ turbulence model and a constant particle drag coefficient $C_D = 0.424$ as the basis for constructing a conjugate CFD DEM model. A numerical experiment was performed using an improved vertical distributor head with nine outlets, where an internal spiral insert with a triangular cross-section in the distributor's discharge pipe serves as a stabilizing element. By varying the spiral geometry by three parameters (the base angle of the triangular cross-section of the

spiral turn α , the number of turns n and the spiral cross-sectional height h), seed flow distribution was studied as the response of a complex gas-dynamic particle system, rather than as a set of local empirical coefficients. The response surface of the variation coefficient shows that it is the spiral cross-sectional height that determines the appropriate range, which significantly reduces seed distribution unevenness at operating speeds typical of modern seeding units. This digital experiment format transforms the CFD DEM model into a practical tool for designing next-generation distributors.

Keywords: uniformity, distribution, seeds, seed tube, seeding system, pneumatic system, vertical distributor, hydrodynamics, discrete element method, CFD-DEM modeling, air-grain mixture.

For citation: A digital twin of a seeding complex pneumatic system based on coupled cfd-dem modeling / S.G. Mudarisov, I.M. Farkhutdinov, V. Kh. Imangulov, R.T. Gareev // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 166-176 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-166-176

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10070
(<https://rscf.ru/project/23-76-10070/>)

Введение

Современные широкозахватные посевные комплексы оснащены пневматическими системами для распределения и транспортировки семян и удобрений от бункеров до сошников. Для распределения семян и удобрений существует большое разнообразие распределительных устройств, отличающихся между собой конструктивными особенностями. Большую популярность приобрели горизонтальные и вертикальные распределительные устройства. В зависимости от ширины захвата посевного комплекса устанавливаются одноступенчатые и многоступенчатые распределители. Для сеялок шириной более 4 м применяют преимущественно двухступенчатое распределение, поскольку увеличивается длина семяпроводов между сошниками, что крайне негативно влияет на качество распределения. Наилучшие показатели по качеству распределения семян получили распределители вертикальной конструкции. Согласно исследованиям [1, 2], неравномерность распределения семян в таких конструкциях достигает до 19,8 %, что непосредственно влияет на урожайность высеваемой культуры. В связи с этим совершенствование существующих и разработка новых конструкций распределительных устройств, обеспечивающих качественное распределение семенного материала по сошникам, является актуальной задачей.

На современном этапе развития агроинженерии математическое моделирование становится неотъемлемой частью проектирования, в том числе в сельскохозяйственном машиностроении. Особую актуальность представляет моделирование пневматических высевочных систем, функционирующих как двухфазные потоки (газ – твердые частицы). Высокая вариативность свойств посевного материала требует тщательной идентификации физико-механических характеристик семян для валидации параметров моделей. Применение сопряженного метода вычислительной гидродинамики (CFD) и дискретных элементов (DEM) при правильном его применении позволяет сформировать адекватный цифровой двойник пневмотранспортного процесса, который является надежной основой для оптимизации конструктивных параметров распределительных устройств.

В работе [1] исследовано влияние геометрии распределительной головки на точность посева в

пневматических сеялках с использованием метода CFD-DEM. Для моделирования воздушного потока в CFD-модели применена стандартная k - ϵ модель турбулентности, а для частиц (семян) в DEM-модели – контактная модель Герца-Миндлина. Авторы с помощью своей модели исследовали равномерность распределения для трех типов семян (рапс, пшеница, рис) для трёх типов конструкций распределительных головок с шестью выходами. Для одного из вариантов конструкции была достигнута высокая равномерность высева: погрешность составляет 0,1 % для рапса, 2,5 % – для пшеницы и 3,1 % – для риса. Исследование показало, что оптимизация геометрии распределительной головки с использованием CFD-DEM модели позволяет значительно улучшить точность посева.

Han D. и соавторы [2] исследовали влияние аэродинамических параметров на работу высевочного аппарата, используя подход сопряжения CFD-DEM и натурные испытания. Оптимизация впускного канала посевного комплекса показала, что определяющим фактором равномерности является скорость воздушного потока: оптимум (коэффициент вариации 19,89 %) достигается при 7 м/с. Превышение порога в 11 м/с ведет к ухудшению показателей. Авторы доказали высокую прогностическую точность CFD-DEM моделей при обосновании конструктивных параметров и режимов работы посевной машины.

Fogal M. и соавторы [3] продемонстрировали применимость CFD-моделирования (ANSYS CFX, k - ϵ модель турбулентности) для оптимизации аэродинамических характеристик посевных машин. На примере двух типов радиальных вентиляторов, работающих при 4000 мин⁻¹, показано преимущество конструкции A1: снижение рециркуляционных потоков позволило повысить ее эффективность на 70 % относительно аналога B1. Обеспечение выходной скорости свыше 25 м/с гарантировало бесперебойную подачу удобрений. Валидация модели показала высокую сходимость результатов: отклонение численных значений от экспериментальных не превысило 4,3 %.

В исследовании Guzman, L. и др. [4] методами вычислительной гидродинамики CFD и дискретных элементов DEM была смоделирована динамика движения семян гороха в горизонтальном трубопроводе пневматической сеялки. Авторы пришли к выводу,

что предложенная CFD-DEM модель адекватно предсказывает среднюю скорость частиц и корректно фиксирует факты их соударений, что подтверждается удовлетворительным согласованием результатов моделирования с экспериментальными данными.

В исследовании Liao Y. и соавторов [5] методом CFD-DEM проанализированы характеристики движения бинарной смеси семян люцерны и коостреца безостого в пневматическом конвейере типа Вентури. Моделирование турбулентного воздушного потока выполнялось с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели, а для описания взаимодействия частиц применялась контактная модель Герца-Миндлина. Результаты показали, что повышение скорости воздуха приводит к снижению количества межчастичных столкновений. Однако чрезмерное увеличение скорости негативно сказывается на равномерности распределения семян в потоке. Эффективность оптимизированной конструкции была подтверждена натурными испытаниями, которые продемонстрировали высокую стабильность состава смеси на выходе: отклонение от заданного соотношения семян не превышало 4 %.

Работа Gu, B. и соавторов [6] посвящена моделированию движения семян пшеницы в пневматической системе высева. Авторы применяли метод дискретных элементов (DEM) и его сопряженную реализацию с вычислительной гидродинамикой (CFD-DEM). Численное моделирование основывалось на стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности для газовой фазы и контактной модели Герца-Миндлина для описания взаимодействия между частицами. Натурные эксперименты подтвердили адекватность предложенного подхода.

Lei, X и соавторы [7] исследовали движение семян пшеницы и рапса в пневматическом высевающем устройстве с центральной дозировкой с использованием сопряженного подхода DEM-CFD. В рамках модели частицы семян описывались в программе EDEM, а газовая фаза - в ANSYS Fluent. Для пшеницы применялась эллипсоидальная форма частицы. Основные параметры контактной модели – коэффициент восстановления, статического и динамического трения, равные 0,42, 0,35 и 0,05 соответственно (для контакта частица–частица). Модель контакта – Hertz–Mindlin. Авторы установили, что основными факторами, определяющими транспортировку семян, являются площадь горловины Вентури-трубы и скорость входного воздушного потока.

Анализ работ по использованию сопряженного CFD-DEM-моделирования пневматических систем посевных машин показывает, что авторы, в основном, используют стандартные подходы к моделированию без обоснования условий их применимости и учета таких важных факторов, как различие режимов течения и взаимодействия по длине транспортных пневмопроводов посевного комплекса, начиная от вентилятора и до сошников. Мухаметдинов А.М. и Мударисов С.Г. в работе [8] на основе экспериментальных

данных показали широкое изменение аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – удобрения» в пневматической системе широкозахватного посевного комплекса. Так объемная концентрация удобрений варьировалась от 0,00022 до 0,008, коэффициент сопротивления частиц – от 0,458 до 0,513, а межфазное число Рейнольдса от 330 до 1319 по длине пневмопроводов.

Мударисов С.Г. и соавторы [9] указывают, что для построения адекватных моделей пневматических систем, в первую очередь, необходимо установить концентрацию воздушно-зерновой смеси в потоке, режимы течения и турбулентности двухфазной среды.

Кроме этого, при моделировании необходимо осознанно подходить и к выбору моделей турбулентности. Моен А. и соавторы [10] сравнивали различные варианты $k-\epsilon$ моделей в задачах истечения и рассеяния газов и показали, что выбор турбулентностной модели существенно влияет на предсказание концентраций и динамики облака.

Liu Z. и соавторы [11] выполнили оценку турбулентных моделей на примере течения со стопорными решетками, демонстрируя, что корректный выбор модели турбулентности улучшает согласование CFD с экспериментом для сложных 3D-течений.

На основе представленных исследований можно сделать заключение, что сопряжение методов CFD и DEM для моделирования процесса работы пневматической системы с семенами может дать адекватные результаты только при должном обосновании режима двухфазного течения. Основным ограничивающим фактором широкого применения методов сопряженного гидродинамического и дискретного моделирования CFD-DEM для описания процесса работы посевных комплексов является сложность определения этих режимов, числа Рейнольдса межфазного взаимодействия и аэродинамического коэффициента твердых частиц.

Цель исследований – разработка модели технологического процесса посевного комплекса сопряженным методом вычислительной гидродинамики (CFD) и дискретных элементов (DEM) на основе экспериментальных аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – семена». На основе уточненной сопряженной CFD-DEM модели течения «воздух-частицы семян пшеницы» необходимо обосновать конструктивные параметры модернизированной вертикальной распределительной головки с девятью выходами и оценить равномерности распределения семян пшеницы.

Материал и методы

Для экспериментального определения аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – семена» разработана лабораторная установка (рис. 1), которая включает в себя бункерную часть посевного комплекса John Deere 1910. Для привода вентилятора 4 посевного комплекса и гидропривода дозирующих катушек высевающего аппарата 3 подключена гидростанция 8, включающая в

себя гидромотор с приводом от электродвигателя и гидрораспределитель. Семена по семяпроводам 7 распределялись вертикальной распределительной головкой 6 типа Аккорд с девятью выходами. Семена с каждого семяпровода собирали отдельно в тару 9.



Рис.1. Лабораторная установка для определения аэродинамических показателей пневматической системы

1 – бункер для семян; 2 – бункер для удобрений; 3 – высевной аппарат; 4 – вентилятор; 5 – распределительный семя-тукопровод; 6 – вертикальный распределитель; 7 – семяпроводы; 8 – гидростанция; 9 – тара для сбора семян

Определение режима течения. Для определения режима течения необходимо рассчитать массовую и объемную концентрации семян в пневматической системе. Массовая концентрация частиц семян [12, 13]:

$$W = \frac{Q \rho_p}{\rho}, \quad (1)$$

где Q – объёмная концентрация частиц; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; ρ_p – плотность твердых частиц (семян), кг/м^3 ;

Объёмная концентрация частиц

$$Q = \frac{k \pi d_s^3}{6}, \quad (2)$$

где k – счетная концентрация частиц, кг/м^3 ; d_s – эквивалентный диаметр твердых частиц (семян), м.

Счетная концентрация семян зависит от нормы высева семян Q_c , рабочей скорости V_c и ширины захвата B_p сеялки, а также от массы 1000 штук семян m_h [10]:

$$k = \frac{B_p V_c Q_c}{10 m_h}. \quad (3)$$

В расчетах принимали норму высева семян $Q_c = 180 \text{ кг/га}$, ширину захвата одной секции сеялки $B_p = 8,1 \text{ м}$, рабочую скорость $V_c = 10 \text{ м/с}$, массу 1000 штук семян $m_h = 35...40 \text{ г}$.

В связи с тем, что семена зерновых сельскохозяйственных культур не имеют шарообразной формы и характеризуются тремя параметрами – длиной l , шириной a и толщиной b , в формулах (2, 5) использовали средний эквивалентный диаметр зерновок

$$d_s = \sqrt[4]{\frac{(l a b)^2}{\pi}}. \quad (4)$$

Для измерений параметров семян использовали микрометр МКЦ-25 «Зубр» с погрешностью 2 мкм. Для определения геометрических размеров семян использованы не менее 1000 семян, отобранных случайным образом из навески. Измерения выполняли в трехкратной повторности.

Для выбора модели турбулентности и коэффициента сопротивления частицы при моделировании двухфазных течений необходимо определить межфазное число Рейнольдса, показывающее относительное запаздывание частиц:

$$Re_p = \frac{d_s \rho (v - V)}{\eta}, \quad (5)$$

где η – динамическая вязкость воздуха, $\text{Па}\cdot\text{с}$; v – скорость воздушного потока, м/с ; V – скорость семян, м/с .

Для оценки скорости семян в пневматической системе была установлена прозрачная трубка-вставка перед распределительной головкой (рис. 2). Скорость потока семян фиксировалась фотоаппаратом с разрешением 60 кадров секунду и замедлением в 10 раз. Ввиду того, что даже такое замедление не позволяет точно определить скорость семян, особенно на горизонтальных участках с малым диаметром трубок, дальнейшую обработку видеоизображений выполняли средствами искусственного интеллекта на базе библиотеки OpenCV, реализующей алгоритмы компьютерного зрения для сегментации и автоматического сопровождения частиц в видеопотоке [18, 19]. Метод основан на автоматизированном покадровом анализе движения частиц. На исходном видеоматериале выполняется калибровка пространственного масштаба по объекту с известными размерами (измерительная линейка), после чего осуществляется сегментация семян по цветовому признаку в пространстве HSV (Hue, Saturation, Value – тон, насыщенность, значение), вычисление центроидов и построение их индивидуальных траекторий. Скорость движения отдельных семян определяется как отношение пройденного расстояния к интервалу времени между моментами фиксирования начальной и конечной координаты трека.



Рис. 2. Полет частиц в трубке

Одной из задач экспериментов была оценка равномерности распределения семян пшеницы по выходам из сеянопроводов при установленной норме высева пшеницы 180 кг/га. Скорость воздушного потока перед распределительной головкой, согласно измерениям, составила в среднем 30 м/с. Скорость воздушного потока измеряли трубкой Пито в пятикратной повторности.

Равномерность распределения семян оценивали по коэффициенту вариации:

$$k_V = \frac{\mu}{m} 100\%, \quad (6)$$

где μ – стандартное отклонение равномерности высева; m – средняя масса семян, г.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^s m_i}{s}, \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s (m_i - m)^2}}{s-1}, \quad (8)$$

где m_i – масса семян на выходе из сеянопровода, г; s – количество выходов (в данном исследовании – 9).

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивали по критерию Стьюдента, адекватность полученной модели – по критерию Фишера.

Методика моделирования в Ansys-Rocky DEM. При моделировании пневматической системы (распределителя) посевной машины сопряженным методом CFD-DEM использовали программный комплекс Ansys-Rocky DEM.

Для моделирования движения семян зерновых культур методом дискретных элементов DEM на основе предыдущих наших исследований наиболее подходящим является линейная вязкоупругая модель контакта (*Linear Spring Dashpot*) [15]. Параметры контактной модели приведены в таблице 1. Данные получены на основе собственных измерений и литературных источников.

Параметры воздушного потока для CFD-моделирования приведены в таблице 2. Скорость воздушного потока на входе в распределитель $v = 30$ м/с поддерживалась за счет вентилятора посевного комплекса.

Таблица 1. Параметры контактной модели пшеницы

Показатель	Среднее значение	Источник информации
Модуль Юнга E , МПа	100	[6]
Коэффициент Пуассона ν_p	0,3	[6]
Коэффициент статического трения частица-частица f_{st}	0,4	[1]
Коэффициент динамического трения частица-частица f_d	0,3	[1]
Эквивалентный диаметр частиц d , мм	2,8	на основе собственных измерений (таблица 4)
Соотношение сторон по вертикали частиц	2,20	
Соотношение сторон по горизонтали частиц	0,90	
Коэффициент статического трения частица-корпус $f_{st,k}$	0,3	[1]
Коэффициент динамического трения частица-корпус $f_{d,k}$	0,3	[1]

Таблица 2. Параметры воздушного потока

Показатель	Среднее значение	Комментарии
Скорость воздушного потока на входе распределителя, м/с	30	на основе собственных измерений
Начальное избыточное давление, Па	0	[1, 2, 5]
Интенсивность турбулентности, % *	5	[1, 2, 5]
Коэффициент турбулентной вязкости воздуха **	10	[1, 2, 5]
Плотность воздуха, кг/м ³	1,225	[1, 2, 5]
Динамическая вязкость воздуха, кг/(м·с)	$1,7984 \cdot 10^{-5}$	[1, 2]

* Интенсивность турбулентности — это относительная мера пульсаций скорости в потоке. Для труб и каналов – от 3,5 % до 5 % [17].

** Коэффициент турбулентной вязкости воздуха представляет собой эффективную величину, учитывающую эффекты турбулентного перемешивания в моделировании турбулентных потоков, при числе Рейнольдса $Re > 1000$ варьируется от 1 до 15 [17].

Методика сопряженного CFD-DEM моделирования реализована в программном комплексе Ansys Workbench и включает последовательную настройку

связи между модулями Ansys Fluent (CFD) и Rocky DEM (рис. 4). Процедура состоит из следующих основных этапов.

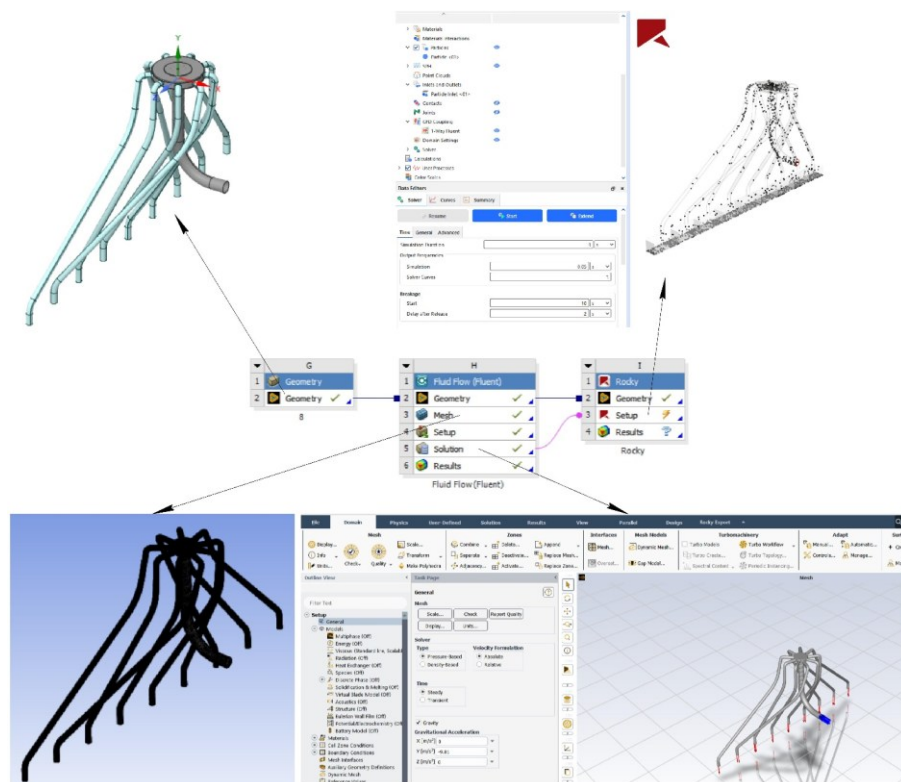


Рис. 4. Процесс сопряженного моделирования CFD-DEM

1. Геометрическое моделирование (Geometry). Трехмерная модель рабочего объема (в нашем случае, распределителя) создается в ANSYS SpaceClaim. Геометрия включает объемную область течения газовой фазы (для расчета в Fluent). Все поверхности, контактирующие с частицами (стенки, препятствия), экспортируются в Rocky DEM для учета взаимодействия.

2. Построение и настройка вычислительной сетки (Meshing). Для задач, учитывающих движение частиц, критически важна точность разрешения потока в пристеночных областях. Для этого использовали слои сгущения (Inflation Layers) у твердых границ. На этом же этапе задавали граничные условия для CFD-расчета: вход (inlet), выход (outlet) и стенки (wall). Пример заданных граничных условий для модели распределителя представлен на рисунке 5.

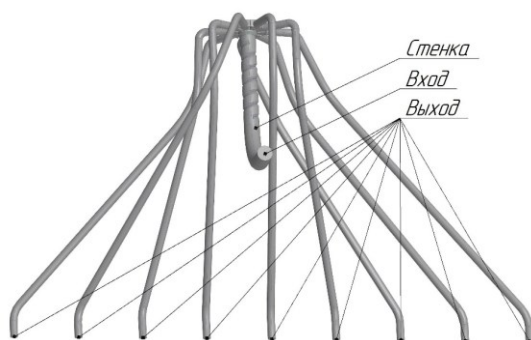


Рис. 5. Граничные условия распределителя

3. Настройка параметров CFD-модели (Setup – Fluen). В модуле Fluent задавали параметры модели газового потока. На основании анализа литературных данных [3, 4, 5] для моделирования турбулентного течения воздуха в пневматических системах была предварительно выбрана стандартная $k-\epsilon$ (k-epsilon) модель, обеспечивающая удовлетворительный компромисс между вычислительной эффективностью и точностью. Для ранее заданных границ определили условия: на входе устанавливали скорость потока (velocity inlet), на выходе – статическое давление (pressure outlet).

4. Настройка параметров DEM-модели (Setup – Rocky DEM). В модуле Rocky DEM определяли свойства моделируемых частиц (семян пшеницы): геометрические характеристики (размер, геометрия), плотность, физико-механические свойства, необходимые для расчета контактных взаимодействий. Созданные частицы загружали в расчетную область, соответствующую экспортированной геометрии стенок.

5. Время расчета выбирали, исходя из предварительно выполненных технологических расчетов времени транспортировки семян в пневматической системе.

6. Равномерность распределения семян пшеницы оценивали на основе Эйлеровой статистики путём определения массы семян в отдельно взятых ячейках.

Для повышения равномерности распределения семян в нагнетательную трубу распределителя была установлена вставка в форме спирали. Длина данной спирали составила 300 мм. Спираль выполнена в

виде треугольника с углом поперечного сечения α , количеством витков n и высотой поперечного сечения h (рис. 6).

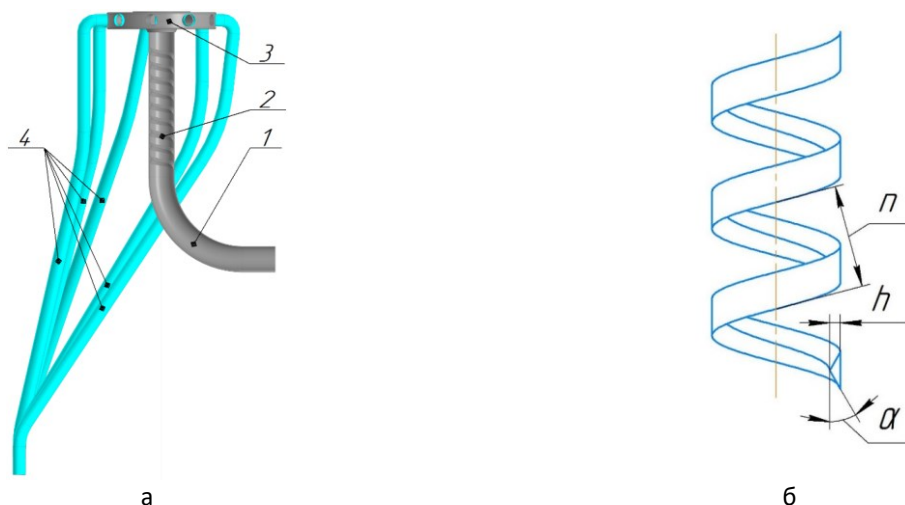


Рис. 6. Экспериментальный вертикальный распределитель со вставкой:

а - трехмерная модель; б – схема вставки в форме спирали; 1 – нагнетательная труба; 2 – вставка в форме спирали; 3 – распределительная головка; 4 – семяпроводы

Оценка равномерности высева с помощью модели. Для изучения влияния вставки в форме спирали на равномерность распределения семян по девяти выходам из распределителя был проведен трехфакторный эксперимент на трех уровнях согласно плану Бокса-Бенкина [14]. По окончании расчета фиксировали массу семян на выходе из семяпроводов. В качестве исследуемых факторов с учетом

предложенной конструкции выбраны: X1 – угол поперечного сечения спирали α в пределах от 25° до 35° ; X2 – количество витков спирали n от 6 до 12 шт., X3 – высота поперечного сечения спирали h от 2,5 мм до 7,5 мм. В качестве выходного параметра принят коэффициент вариации массы семян по выходам k_v . В таблице 3 представлены факторы и интервалы их варьирования.

Таблица 3. Факторы и интервалы их варьирования

Характеристика плана	X1 (α), град. - угол поперечного сечения спирали	X2 (n), шт. - количество витков	X3 (h), мм - высота поперечного сечения спирали
Нижний уровень	25	6	2,5
Нулевой уровень	30	9	5
Верхний уровень	35	12	7,5
Интервал варьирования	5	3	2,5

Результаты

Определение режима течения. Результаты измерений семян пшеницы сорта Ватан показал, что средняя длина l , ширина a и толщина b семян соответственно составили 4,78 мм, 2,62 мм и 2,08 мм.

Концентрацию частиц определяли, исходя из нормы высева семян. Расчет выполняли для нормы высева семян пшеницы 180 кг/га, при скорости движения посевного комплекса 10 км/ч, числе сошников - 54. При расчётной часовой производительности агрегата 8,72 га/ч, за 1 с с одного сошника будет сходиться от 7,3 г до 8,4 г семян. С учетом массы 1000 семян пшеницы равной 35...40 г, за 1 с, согласно формуле (3), один сошник будет высевать от 190 до 225 семян.

Для семяпровода внутренним диаметром 0,06 м расчётный объём на 1 м его длины составит 0,0079 м³. Тогда за 1 с по трубке транспортируется от

21695 до 26121 семян. При этом объёмная концентрация, согласно формуле (2),

$$Q = \frac{(21695 \dots 26121) \cdot 3,14 \cdot 0,0028^3}{6} = 2,5 \dots 3 \cdot 10^{-4},$$

а по формуле (1) массовая концентрация

$$W = \frac{((0,0025 \dots 0,003) \cdot 10^{-4}) \cdot 1400}{1,225} = 0,285 \dots 0,342.$$

Согласно классификации двухфазных течений [12] по объёмной концентрации частиц, при такой массовой концентрации двухфазные течения относят к сильно запылённым и турбулентным.

Согласно формуле (4) межфазное число Рейнольдса

$$Re_p = \frac{(0,0028 \dots 0,0031) \cdot 1,225(30 - 1,9)}{1,82 \cdot 10^{-5}} = 5295 \dots 5863.$$

Согласно стандартной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса [14], в интервале $Re_p \approx (5,3 \dots 5,9) \cdot 10^3$ режим обтекания соответствует автомодельной

области (закону Ньютона), для которой коэффициент лобового сопротивления C_D слабо зависит от Re_p и может быть принят постоянным. В соответствии с литературными данными для стабильного обтекания частиц сферической формы в этом режиме принимают $C_D = 0,424$ [13]. Кроме того, полученный диапазон изменения межфазного числа Рейнольдса доказывает правильность выбора k - ϵ (k -epsilon) модели турбулентности при моделировании двухфазных течений «воздушный поток – семена» в пневматических системах посевных комплексов.

Рассчитанные параметры (Re_p и постоянный C_D) были использованы для настройки модели взаимодействия фаз в рамках имитационного моделирования технологического процесса.

Обоснование конструктивно-технологических параметров экспериментального вертикального распределителя.

В таблице 4 представлены результаты реализации плана матрицы Бокса-Бенкина.

Таблица 4. Результаты реализации матрицы Бокса-Бенкина

№	X1 – угол α , град	X2 – количество витков n , шт.	X3 – высота поперечного сечения h , мм	γ – коэффициент вариации k_v , %
1	25	6	5	12,8
2	25	12	5	12,6
3	35	6	5	12
4	35	12	5	15,5
5	25	9	2,5	24,4
6	25	9	7,5	17,4
7	35	9	2,5	37
8	35	9	7,5	16,1
9	30	6	2,5	18
10	30	6	7,5	12,3
11	30	12	2,5	11,1
12	30	12	7,5	17
13	30	9	5	12,8
14	30	9	5	12,8
15	30	9	5	12,8

Для статистической обработки использовали пакет Statistica 10. В результате получили уравнение регрессии в закодированном виде

$$\gamma = 17,18 - 3,075(X_3)^2. \quad (8)$$

Таблица 5. Распределение семян по семяпроводам

№	Масса семян, г									$m_{ср}$	σ	k_v , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	4,4	4,0	4,6	4,0	5,3	4,7	5,2	3,6	5,0	4,5	1,2	12,8
2	4,4	5,2	4,5	5,3	4,7	5,9	4,1	4,1	4,7	4,8	1,0	12,6
3	4,0	5,0	5,3	4,7	4,2	5,1	4,6	3,7	4,4	4,6	0,7	12,0
4	4,1	5,2	5,6	5,0	4,4	4,5	4,1	3,4	3,8	4,5	0,6	15,5
5	3,3	5,9	5,6	4,1	5,6	4,3	3,9	2,7	5,1	4,5	1,0	24,4
6	5,5	3,9	5,3	5,3	3,4	5,0	4,5	4,1	5,8	4,7	0,8	17,4
7	2,6	6,1	6,2	3,3	3,3	2,9	3,1	2,7	3,6	3,8	1,6	37,0
8	4,3	4,2	5,1	4,9	3,4	4,3	5,5	4,6	5,9	4,7	1,2	16,1
9	5,4	5,0	5,0	3,6	4,0	3,4	4,4	3,4	4,0	4,3	1,6	18,0
10	4,6	5,3	5,3	4,6	4,4	3,9	3,9	4,1	5,2	4,6	1,7	12,3
11	4,5	4,7	4,7	4,5	4,2	3,9	3,8	3,4	4,6	4,2	2,1	11,1
12	4,4	4,5	4,0	4,0	4,9	6,0	4,4	4,4	6,1	4,7	2,3	17,0
13	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	2,6	12,8
14	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	2,9	12,8
15	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	3,2	12,8

Значимым при 95 % уровне значимости является фактор X3 – высота поперечного сечения спирали.

Уравнение (6) в раскодированном виде:

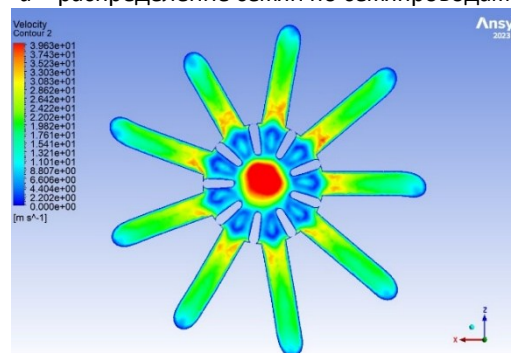
$$k_v = 4,92h - 0,492h^2 + 4,88 \quad (9)$$

Данное уравнение справедливо при h от 2,5 мм до 7,5 мм.

Анализ результатов моделирования CFD-DEM. Результаты моделирования технологического процесса распределителя сопряженным методом CFD-DEM представлены на рисунке 7. Изображенная на рисунке 7б – эпюра скоростей воздушного потока в виде распределения по цветам показывает, что скорости воздушного потока на выходе из распределительной головки примерно одинаковы.



а – распределение семян по семяпроводам



б – эпюра скорости воздушного потока

Рис. 7. Результаты моделирования

В таблице 5 представлены результаты модельного эксперимента по оценке распределения семян по семяпроводам согласно матрице планирования и статистические характеристики.

На рис. 8 представлена гистограмма распределения массы семян пшеницы на выходе из семяпроводов. Несмотря на равномерное распределение воздушного потока на выходе из распределительной головки (рис. 7б) наблюдается относительно небольшая неравномерность распределения семян по семяпроводам (рис. 8).

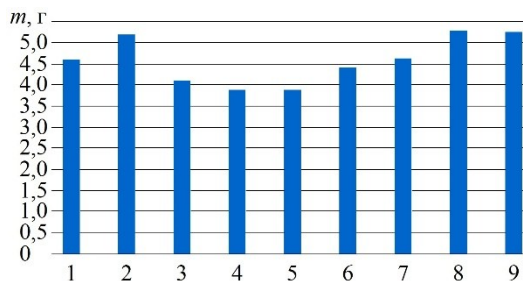


Рис. 8. Гистограмма распределения массы семян по семяпроводам

На рис. 9 представлена в виде поверхности отклика зависимость коэффициента вариации массы семян по выходам k_v от угла поперечного сечения спирали α и высоты поперечного сечения h .

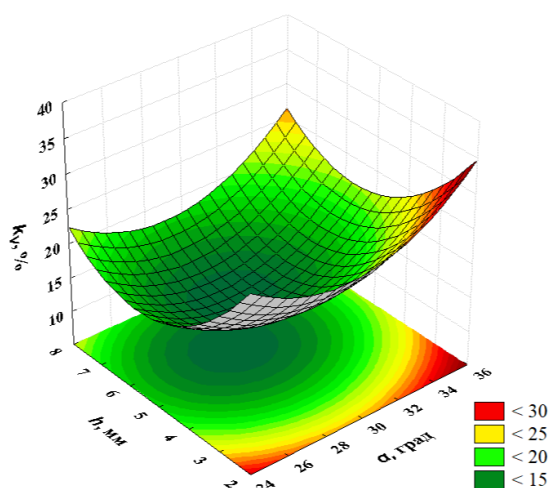


Рис. 9. Зависимость коэффициента вариации массы семян по выходам k_v от угла поперечного сечения спирали α и высоты ее поперечного сечения h

Согласно рис. 9, равномерность распределения семян по семяпроводам повышается при угле поперечного сечения спирали α от 27° до 30° и высоте поперечного сечения h от 4 мм до 6 мм и составляет 11,1 %, что ниже на 1,9 % чем у стандартного вертикального распределителя.

Обсуждение

Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность сопряженного CFD-DEM моделирования для анализа и оптимизации пневматических систем посевных комплексов, что согласуется с результатами работ [4, 6, 7]. В отличие от известных исследований, где параметры моделей часто принимают по умолчанию, в данной работе выбор модели

турбулентности и коэффициента аэродинамического сопротивления обоснован на основе экспериментально исследования режима течения. Полученные значения массовой концентрации ($W = 0,285...0,342$) и межфазного числа Рейнольдса ($Re_p \approx 5,3...5,9 \cdot 10^3$) классифицируют исследуемый поток как сильно запыленный турбулентный режим, что коррелирует с выводами [8, 9] о существенной вариативности аэродинамических показателей двухфазного течения по длине пневмопроводов посевного комплекса. Данный результат также согласуется с теоретическими положениями, изложенными в работах Волкова К.Н. [12] и Вараксина А.Ю. [13], где показано, что при таких значениях Re_p коэффициент сопротивления C_D становится слабо зависимым от режима обтекания и может быть принят постоянным ($C_D = 0,424$). Это фундаментальное положение обосновывает выбор стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности для CFD-части сопряженной модели, что коррелируется с выводами Moen A. et al. [10], продемонстрировавшими адекватность данной модели для широкого класса задач.

Результаты модернизации распределительной системы с помощью вставки в форме спирали показывают, что коэффициент вариации (k_v) снизился до 11,1 % при оптимальных параметрах. Для сравнения, Albasheer A.H. et al. [1] достигли еще более высокой равномерности (CV 2,5% для пшеницы) за счет использования барьерной конструкции распределительной головки (тип A2). Однако конструкция [1] предполагает наличие 6 выходов и специфических барьеров, тогда как в нашей работе модернизирован стандартный распределитель с 9 выходами типа «Аккорд», что технологически проще при реализации в серийно выпускаемых машинах. Han D. et al. [2] установили, что определяющим фактором равномерности является скорость воздушного потока (оптимум – 7 м/с для высевящего аппарата), однако в разработанной пневматической системе скорость на входе в распределитель составляет 30 м/с, что обусловлено требованиями пневмотранспорта на предыдущих участках. Полученная нами неравномерность распределения семян по выходам распределителя (11,1 %) является приемлемой для широкозахватных агрегатов и достигнута за счет стабилизации потока перед точкой разделения (рис. 7б), что коррелирует с выводами Liao Y. et al. [5] о важности совершенствования конструкции подающих труб для стабильности транспортировки.

Научная значимость полученных результатов заключается в переходе от эмпирического подбора геометрии распределителей к методике цифрового двойника, основанной на определении режима двухфазного течения. В отличие от многих предыдущих работ, где параметры турбулентности и сопротивления выбирали по умолчанию, данное исследование предлагает иной алгоритм: экспериментальное определение Re_p и концентрации, обоснование выбора модели турбулентности ($k-\epsilon$, постоянный C_D) и оптимизация конструктивных параметров

распределительной системы. Такой подход, сочетающий физическое обоснование с практической инженерной задачей, позволяет сократить объем натурных испытаний и повысить эффективность предлагаемых решений при модернизации существующих и вновь создаваемых пневматических систем посевных комплексов.

Заключение

Экспериментальные исследования на лабораторной установке, созданной на базе посевного комплекса John Deere 1910, позволили определить диапазоны объемной и массовой концентраций семян пшеницы в пневмопроводах, отнести поток к сильно запылённым турбулентным течениям и вычислить межфазное число Рейнольдса $Re_p \approx (5,3...5,9) \cdot 10^3$.

В указанном диапазоне Re_p режим обтекания частиц соответствует автомодельной (ньютоновской) области, что: дает возможность принять коэффициент лобового сопротивления частиц зерна C_D постоянным и равным 0,424; обосновывает использование стандартной k - ϵ модели турбулентности при CFD-моделировании газовой фазы.

Результаты регрессионного анализа показали, что при уровне значимости 95 % существенное влияние на равномерность распределения семян оказывает преимущественно высота поперечного сечения спирали h .

Равномерность распределения семян по семяпроводам повышается и составляет 11,1 %, что на 1,9 % ниже, чем у стандартного вертикального распределителя, при угле поперечного сечения спирали α в диапазоне $27...30^\circ$, высоте поперечного сечения h в пределах 4...6 мм и числе витков спирали n от 6 до 12.

Разработанная и верифицированная на экспериментальных данных сопряжённая CFD-DEM-модель может быть использована как инструмент виртуальных исследований при оптимизации геометрии и режимов работы элементов пневматических систем посевных комплексов, сокращая объём натурных экспериментов и повышая эффективность конструкторско-технологических решений по обеспечению равномерности высева.

Литература

1. Design and Optimization of Divider Head Geometry in Air-Assisted Metering Devices for Enhanced Seed Distribution Accuracy / A. H. Albasheer, Q. Liao, L. Wang, et al. // *Agronomy*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 769. doi:10.3390/agronomy15040769
2. Measurement of the seed spacing uniformity of a seed-metering device as a function of the positive pressure inlet structural parameters based on CFD-DEM / D. Han, T. Mo, Y. Wang, et al. // *Measurement*. 2025. doi:10.1016/j.measurement.2025.116893
3. Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders / M. L. F. Fogal, G. B. Micheli, V. L. Scaloni, et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 58–64. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p58-64.
4. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 12. P. 1597. doi:10.3390/pr8121597.
5. Movement characteristics of mixed alfalfa and awnless brome seeds within a Venturi conveyor based on CFD-DEM / Y. Liao, X. Zhou, Y. You, et al. // *Powder Technology*. 2025. Vol. 455. P. 120735.
6. Establishment of a Discrete Element Model for Wheat Particles Based on the Ellipsoidal Method and CFD-DEM Coupling / B. Gu, C. Hu, J. Xing, et al. // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 369. doi:10.3390/agriculture15040369.
7. Lei X., Liao Y., Liao Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 131. P. 29–39. doi:10.1016/j.compag.2016.11.006
8. Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г. Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневмосистеме посевного комплекса // *Инженерные технологии и системы*. 2025. Т. 35. № 2. С. 243–265. doi:10.15507/2658-4123.035.202502.243-265
9. Мударисов С. Г., Рахимов З. С., Гареев Р. Т. Моделирование пневматических распределительных систем зерновых сеялок методами двухфазных течений // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 4(44). С. 45–49. doi:10.18286/1816-4501-2018-4-45-49. EDN: YTSMGL
10. Moen A., Mauri L., Narasimhamurthy V. Comparison of k - ϵ models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. doi:10.1016/J.PSEP.2019.08.016
11. CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders / Z. Miao, S. Kuang, H. Zughbi, et al. // *Powder Technology*. 2019. Vol. 349. P. 0–83. doi:10.1016/J.POWTEC.2019.03.031
12. Волков, К. Н. Емельянов В. Н. Течения газа с частицами // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 600 с.
13. Вараксин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами // М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2003. 185 с.
14. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.
15. Оценка значимости и выбор параметров контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов / С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 19. № 1(73). С. 54–60. doi:10.12737/2073-0462-2024-54-60.
16. Богус А. Э. Технологические и конструктивные параметры пневматической сеялки с центрально-дозировочной системой // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского*

государственного аграрного университета. 2020. № 159. С. 14-21. doi:10.21515/1990-4665-159-002.

17. Вараксин А. Ю. Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 441-466.

18. Performance evaluation of a high-speed maize seed-metering device using an improved YOLOv5s object detection and tracking algorithm / P. Zhao, X. Wu, H. Cheng, et al. // Smart Agricultural Technology. 2025. P. 100997. doi:10.1016/j.atech.2025.100997

19. Zhu J., Buchmann C. M., Schurr F. M. Improving measurements of the falling trajectory and terminal velocity of wind-dispersed seeds // Ecology and Evolution. 2022. Vol. 12. No. 8. doi:10.1002/ece3.9183

References

1. Design and Optimization of Divider Head Geometry in Air-Assisted Metering Devices for Enhanced Seed Distribution Accuracy / A. H. Albasheer, Q. Liao, L. Wang, et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 769. doi:10.3390/agronomy15040769

2. Measurement of the seed spacing uniformity of a seed-metering device as a function of the positive pressure inlet structural parameters based on CFD-DEM / D. Han, T. Mo, Y. Wang, et al. // Measurement. 2025. doi:10.1016/j.measurement.2025.116893

3. Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders / M. L. F. Fogal, G. B. Micheli, V. L. Scalon, et al. // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 58-64. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p58-64

4. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // Processes. 2020. Vol. 8. No. 12. P. 1597. doi:10.3390/pr8121597

5. Movement characteristics of mixed alfalfa and awnless brome seeds within a Venturi conveyor based on CFD-DEM / Y. Liao, X. Zhou, Y. You, et al. // Powder Technology. 2025. Vol. 455. P. 120735.

6. Establishment of a Discrete Element Model for Wheat Particles Based on the Ellipsoidal Method and CFD-DEM Coupling / B. Gu, C. Hu, J. Xing, et al. // Agriculture. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 369. doi:10.3390/agriculture15040369

7. Lei X., Liao Y., Liao Q. Simulation of seed motion in a seed feeding device with a DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 131. P. 29-39. doi:10.1016/j.compag.2016.11.006

8. Mukhametdinov A. M., Mudarisov S. G. Experimental evaluation of two-phase flow parameters in the

pneumatic system of a seeding complex // Engineering Technologies and Systems. 2025. Vol. 35. No. 2. P. 243-265. doi:10.15507/2658-4123.035.202502.243-265.

9. Mudarisov S. G., Rakhimov Z. S., Gareev R. T. Modeling of pneumatic distribution systems of grain seeders using two-phase flow methods // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2018. No. 4(44). P. 45-49. doi:10.18286/1816-4501-2018-4-45-49. EDN: YTSMGL

10. Moen A., Mauri L., Narasimhamurthy V. Comparison of k-ε models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS // Process Safety and Environmental Protection. 2019. doi:10.1016/J.PSEP.2019.08.016.

11. CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders / Z. Miao, S. Kuang, H. Zugbhi, et al. // Powder Technology. 2019. doi: 10.1016/J.POWTEC.2019.03.031.

12. Volkov, K. N., Emelianov, V. N. Gas flows with particles // Moscow: FIZMATLIT, 2008. 600 p.

13. Varaksin, A. Yu. Turbulent flows of gas with solid particles // Moscow: OOO Publishing enterprise "Physical and Mathematical Literature", 2003. 185 p.

14. Melnikov, S. V., Aleshkin, V. R., Roshchin, P. M. Experimental planning in studies of agricultural processes // Leningrad: Kolos, 1980. 168 p.

15. Evaluation of the significance and selection of parameters of the contact model in modeling pea seeds using the discrete element method / S. G. Mudarisov, I. M. Farkhutdinov, V. Kh. Imangulov, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2024. Vol. 19. No. 1(73). P. 54-60. doi:10.12737/2073-0462-2024-54-60.

16. Bogus A. E. Technological and design parameters of a pneumatic seeder with a central metering system // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2020. No. 159. P. 14-21. doi:10.21515/1990-4665-159-002.

17. Varaksin, A. Yu., The influence of particles on the turbulence of a carrier gas flow // High Temperature Thermophysics, 2015, Vol. 53, No. 3, P. 441-466.

18. Performance Evaluation of a High-Speed Maize Seed-Metering Device Using an Improved YOLOv5s Object Detection and Tracking Algorithm / P. Zhao, X. Wu, H. Cheng, et al. // Smart Agricultural Technology. 2025. P. 100997. doi:10.1016/j.atech.2025.100997

19. Zhu J., Buchmann C. M., Schurr F. M. Improving measurements of the falling trajectory and terminal velocity of wind-dispersed seeds // Ecology and Evolution. 2022. Vol. 12. No. 8. doi:10.1002/ece3.9183

Разработка комбинированного сошника для повышения эффективности бинарных посевов

Д. Т. Халиуллин✉, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины и оборудование в агробизнесе»

И. Х. Гайфуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе»

Р. М. Шакиров, аспирант кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе»

ФГБОУ ВО Казанский ГАУ

420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 65

✉damirtag@mail.ru

Резюме. В рамках решения задачи повышения эффективности кормопроизводства исследовали возможность совершенствования технологии бинарных посевов за счет разработки нового комбинированного сошника. Целью работы является разработка и обоснование конструкции комбинированного сошника, позволяющего реализовать ресурсосберегающую технологию кормопроизводства на основе бинарных посевов. Обоснована принципиальная схема устройства, основным элементом которого является вращающийся гибкий шнек, обеспечивающий дозированную подачу удобрений. Установлено, что производительность туконаправителя линейно зависит от частоты вращения (n) и диаметра шнека (D): при постоянной $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ производительность при $D = 60 \text{ мм}$ в 5,3 раза выше, по сравнению с производительностью при $D = 20 \text{ мм}$. Выявлено существенное влияние типа удобрения на производительность: максимальный показатель – при работе с карбамидом (120 кг/ч при 140 мин^{-1}), минимальный – с гранулированным помётом (40,8 % от уровня карбамида). Установлено, что потребляемая мощность привода не превышает 1,37 кВт, что подтверждает возможность привода от ходовых колес. Доказана высокая энергоэффективность конструкции: увеличение диаметра шнека с 20 мм до 60 мм при $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ снижает удельную энергоёмкость с 5,6 Вт·ч/кг до 2,8 Вт·ч/кг. Увеличение частоты вращения с 30 мин^{-1} до 270 мин^{-1} повышает износ тукопровода диаметром 20 мм в 4,4 раза, а увеличение диаметра до 60 мм снижает износ на 25 % при $n = 150 \text{ мин}^{-1}$. В результате обсуждения определены рациональные параметры работы устройства: диаметр шнека – 40 мм, а частота вращения – 100...200 мин^{-1} . Такие параметры обеспечивают компромисс между производительностью, энергозатратами и долговечностью. Сделан вывод об эффективности предложенной конструкции и подтверждении теоретической возможности повышения равномерности распределения удобрений на 15...20 %, что приведет к потенциальному увеличению урожайности на 10...15 %.

Ключевые слова: комбинированный сошник, гибкий шнек, бинарные посевы, минеральные удобрения, кормопроизводство, ресурсосберегающие технологии, урожайность.

Для цитирования: Халиуллин Д. Т., Гайфуллин И. Х., Шакиров Р. М. Разработка комбинированного сошника для повышения эффективности бинарных посевов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 177-183. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-177-183

Development of a combined opener to increase the efficiency of binary seeding

D. T. Khaliullin✉, I. Kh. Gaifullin, R. M. Shakirov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Agrarian University»

420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, K. Marx st., 65 ✉damirtag@mail.ru

Abstract. In an effort to improve forage production efficiency, we investigated the possibility of improving binary seeding technology by developing a new combination coulter. The aim of the study was to develop and validate the design of a combination coulter that would enable the implementation of a resource-saving forage production technology based on binary seeding. We developed a schematic diagram of the device, the main element of which is a rotating flexible auger that provides a metered supply of fertilizer. We found that the fertilizer guide's performance is linearly dependent on the rotational speed (n) and the auger diameter (D): the difference between performance at $D = 20 \text{ мм}$ and $D = 60 \text{ мм}$ reaches 5.3 times at $n = 200 \text{ мин}^{-1}$. Fertilizer type significantly impacted performance: the highest performance was achieved with urea (120 kg/h at 140 мин^{-1}), while the lowest was achieved with granulated manure (40.8% of the urea level). The drive power consumption was calculated to be no more than 1.37 kW, confirming the feasibility of using the ground wheels as a drive. The design's high energy efficiency was demonstrated: increasing the auger diameter from 20 to 60 mm at $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ reduced the specific energy consumption from 5.6 to 2.8 Wh/kg. Increasing the rotational speed from 30 to 270 мин^{-1} increased wear on a 20 mm diameter fertilizer line by 4.4 times, while increasing the diameter to 60 mm reduced wear by 25% at 150 мин^{-1} . As a result of the discussion, rational operating parameters were determined: an auger diameter of 40 mm and a rotational speed of 100–200 мин^{-1} , providing a compromise between productivity, energy consumption, and durability. A conclusion was reached on the effectiveness of the proposed design and the theoretical possibility of increasing the uniformity of fertilizer distribution by 15–20%, increasing yields by 10–15%, and saving fertilizers up to 25.5 kg/ha was confirmed.

Keywords: combined coulter, flexible auger, binary seeding, mineral fertilizers, forage production, resource-saving technologies, crop yield.

For citation: Khaliullin D. T., Gaifullin I. Kh., Shakirov R. M. Development of a combined opener to increase the efficiency of binary seeding // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 177-183 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-177-183

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Введение

Повышение эффективности кормопроизводства представляет собой стратегическую задачу национального масштаба, от решения которой напрямую зависит устойчивое развитие животноводства и обеспечение продовольственной безопасности страны [1, 2]. В условиях современных вызовов, включающих климатические изменения [3] и необходимость импортозамещения [4], особую значимость приобретает поиск инновационных решений, позволяющих радикально повысить продуктивность кормовой базы при одновременном снижении ресурсоемкости ее создания [5]. Особое место в этом направлении занимает технология бинарных посевов, демонстрирующая принципиальные преимущества перед традиционными одновидовыми агроэкосистемами. Однако широкое внедрение таких посевов сдерживается техническими ограничениями существующей посевной техники, что создает существенный барьер для реализации потенциала этих высокопродуктивных агроценозов [6].

Анализ конструкций современных сеялок показывает их принципиальную неспособность обеспечить точное выполнение агротехнических требований при бинарных посевах [7]. Основная проблема заключается в том, что существующие машины спроектированы для работы с монокультурами и не учитывают специфику многокомпонентных систем. Одним из технических ограничений при возделывании бобово-злаковых агроценозов остается несовершенство систем для локального внесения удобрений. Существующие технические средства не могут обеспечить точное размещение минерального питания в корнеобитаемом слое почвы и тем самым реализовать главное агрономическое преимущество локального внесения – возможность снижения норм расхода на 30...50 %. Эта приводит к значительным потерям питательных веществ, их низкой эффективности использования и, как следствие, не позволяет культурам в полной мере реализовать свой природный потенциал продуктивности [8, 9, 10].

Целью данной работы являлась разработка и обоснование конструкции комбинированного сошника, позволяющего реализовать ресурсосберегающую технологию кормопроизводства на основе бинарных посевов.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели разработана схема и выполнено теоретическое обоснование конструкции комбинированного сошника. При этом

использовали методы патентного поиска, сравнительного анализа и инженерного проектирования.

Особенностью предложенной новой конструкции комбинированного сошника является одновременное формирование семенного ложа и локальное внесение удобрений на заданную глубину. Принципиальная схема разработанного устройства представлена на рисунке 1.

Принцип работы комбинированного сошника основан на последовательном выполнении технологических операций. Стрельчатая лапа подрезает почвенный пласт и рыхлит его, создавая зону для последующего размещения семян и удобрений. Через направлятель семена поступают на уплотненное скатной пластиной ложе. Параллельно этому процессу удобрение транспортируется по туконаправителю к месту заделки. Принудительную подачу и дозирование удобрений обеспечивает вращающийся гибкий шнек, привод которого осуществляется от опорно-приводных колес сеялки через механический редуктор. Регулирование передаточного отношения редуктора позволяет изменять частоту вращения гибкого шнека и, соответственно, норму внесения, независимо от скорости движения агрегата.

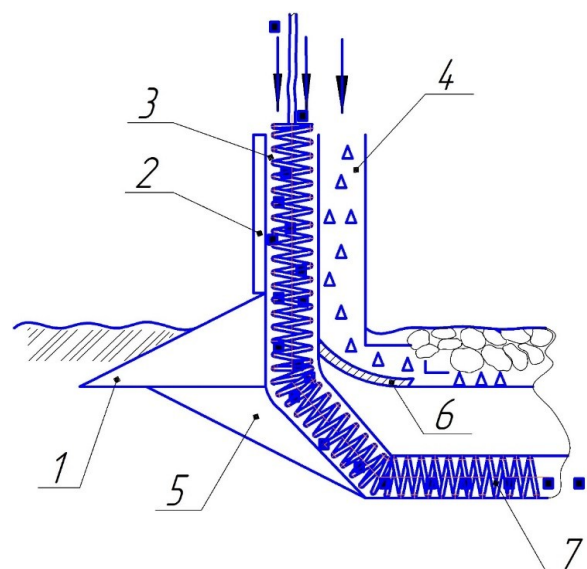


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированного сошника:

1 – лапа, 2 – стойка, 3 – туконаправитель, 4 – направлятель семян, 5 – двухгранный клин в виде ножа, 6 – скатная пластина, 7 – гибкий шнек

Производительность туконаправителя, кг/ч зависит от гибкого шнека как основного рабочего органа и определяется по формуле [11]:

$$Q = 60 \frac{\pi D^2}{4} S n \psi \rho \quad (1)$$

где $\pi D^2/4$ – площадь поперечного сечения тукопровода, м²; D – диаметр гибкого шнека, м; S – шаг гибкого шнека, м; n – частота вращения гибкого шнека, мин⁻¹; ψ – коэффициент заполнения; ρ – насыпная плотность удобрений, кг/м³.

Привод гибкого шнека включает механический редуктор с регулируемым передаточным отношением. Потребляемую мощность Вт рассчитывают для каждого заданного режима работы по формуле (2) [12]:

$$N = \frac{Q L \omega g k}{3600}, \quad (2)$$

где L – длина транспортирования, м; ω – коэффициент сопротивления движению, учитывающий трение материала о стенки тукопровода и внутреннее трение частиц; g – ускорение свободного падения, м/с²; k – количество тукопроводов, шт.

Удельную энергоёмкость, Вт·ч/кг, рассчитывают как отношение потребляемой мощности к производительности туконаправителя [13]:

$$E = N/Q. \quad (3)$$

Для прогнозирования влияния внутрипочвенного локального внесения удобрений на продуктивность агроценозов используют модель, учитывающую как повышение коэффициента эффективности удобрений за счет размещения в слоях почвы с лучшей обеспеченностью влагой, так и улучшение равномерности распределения питательных веществ [14]:

$$\Delta Y = \frac{N Y_0 (K_3 \Gamma P)}{100} \quad (4)$$

где ΔY – прибавка урожайности, т/га; Y_0 – исходная урожайность, т/га; K_3 – коэффициент эффективности удобрений; Γ – коэффициент глубины внесения; P – коэффициент равномерности распределения.

Формула (4) позволяет прогнозировать агрономическую эффективность технологии, но для комплексной оценки её рентабельности необходимо также учесть экономию самих удобрений. Локализация удобрений в почве не только повышает их доступность для растений, но и минимизирует непродуктивные потери (например, за счет улетучивания, вымывания и т.д.). Экономию ресурсов от применения данной технологии можно оценить по формуле [20]:

$$\Delta = H \cdot (Kp_1 - Kp_2) / 100, \quad (5)$$

где Δ – экономия удобрений, кг/га; H – норма внесения удобрений, кг/га; Kp_1 – потери при поверхностном внесении, %; Kp_2 – потери при глубоком локальном внесении, %.

Для сравнительного анализа транспортных характеристик и оценки универсальности рабочего органа методом теоретического моделирования были рассмотрены пять типовых видов удобрений: карбамид, аммиачная селитра, нитроаммофоска, суперфосфат и гранулированный помёт. Моделирование

основывалось на учёте экспериментально определённых для каждого материала значений насыпной плотности и коэффициента заполнения рабочей камеры. В результате для каждого удобрения были получены индивидуальные зависимости производительности от частоты вращения шнека, что составило основу для последующего сравнительного анализа.

Посевной агрегат шириной захвата 1,2 м оснащен четырьмя сошниками для локального внутрипочвенного внесения удобрений. При этом доза, обеспечиваемая одним сошником, определяется агротехническими требованиями для выбранной культуры и удобрения.

Результаты

В соответствии с поставленной задачей была определена производительность туконаправителя с различными диаметрами тукопровода и построена зависимость производительности Q от частоты вращения гибкого шнека n при различных значениях его диаметра D (рис. 2).

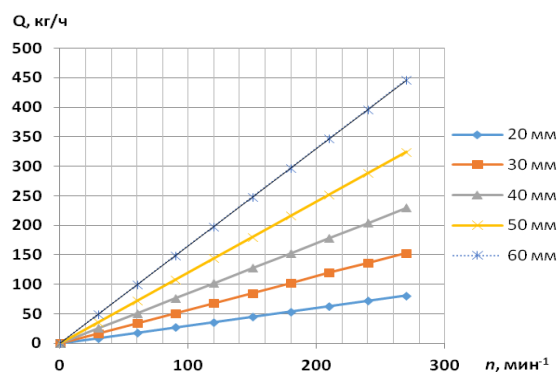


Рис. 2. Зависимость производительности туконаправителя от частоты вращения гибкого шнека при его различных диаметрах

Анализ зависимостей выявил значительное влияние диаметра гибкого шнека на производительность системы – разница между показателями при использовании гибких шнеков диаметром 20 мм и 60 мм достигает 5,3 раза при их одинаковой частоте вращения – 200 мин⁻¹. Полученные данные позволяют определить рациональные параметры работы туковысевающего аппарата для различных видов удобрений и норм их внесения. Достаточная производительность достигается при использовании гибкого шнека диаметром 40 мм с частотой вращения в пределах 100...200 мин⁻¹. Этот режим, находясь в зоне высокой энергоэффективности, полностью удовлетворяет агротехническим требованиям и подтверждает корректность выбранных конструктивных параметров разработанного комбинированного сошника.

Исследуемые удобрения демонстрируют значительный разброс реологических свойств, что непосредственно отражается на их транспортных характеристиках (рис. 3).

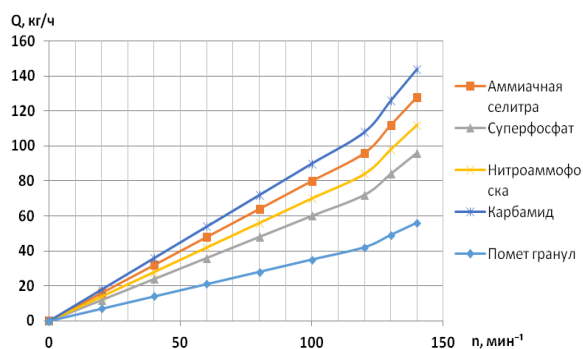


Рис. 3. Зависимости производительности туко-направителя от частоты вращения гибкого шнека при работе с различными удобрениями

Как видно из представленной на рис. 3 теоретической зависимости, производительность линейно возрастает с увеличением частоты вращения рабочего органа. Максимальная производительность туковысевающего аппарата достигается при работе с карбамидом (0,2837...120 кг/ч в диапазоне 1...140 мин⁻¹) благодаря его оптимальной сыпучести. При использовании аммиачной селитры производительность снижается на 6,7 % из-за её склонности к слеживанию [15, 16]. Нитроаммофоска обеспечивает стабильный высев, но из-за гигроскопичности общая производительность составляет 82 % от уровня карбамида. Для суперфосфата производительность в наибольшей степени зависит от гранулометрии из-за полидисперсного состава [17,18]. Наименьший показатель – 40,8 % от уровня карбамида зафиксирован для гранулированного помёта, что объясняется его адгезионными свойствами и хрупкостью гранул [19].

Расчет по формуле (2) показал, что потребляемая мощность привода не превышает 1,37 кВт. Полученное значение подтверждает возможность эффективной работы разработанного сошника от привода ходовых колес сеялки. Рассчитанная мощность демонстрирует энергетическую эффективность конструкции и достаточность стандартного механического привода сеялки для реализации технологического процесса.

Оценка удельной энергоёмкости по формуле (3) показала ее существенное снижение с ростом диаметра гибкого шнека, что свидетельствует о выигрыше в энергоэффективности предлагаемой конструкции (рис. 4).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на удельную энергоёмкость оказывают влияние как частота вращения гибкого шнека, так и его диаметр. Увеличение частоты вращения с 30 мин⁻¹ до 270 мин⁻¹ при диаметре 20 мм приводит к снижению удельной энергоёмкости с 6,8 Вт·ч/кг до 4,4 Вт·ч/кг. Увеличение диаметра шнека с 20 мм до 60 мм при частоте вращения 150 мин⁻¹ приводит к снижению удельной энергоёмкости с 5,6 Вт·ч/кг до 2,8 Вт·ч/кг. Это следует учитывать при проектировании и оптимизации механизмов с гибкими шнеками, стремясь к достижению оптимального баланса

между производительностью и энергоэффективностью.

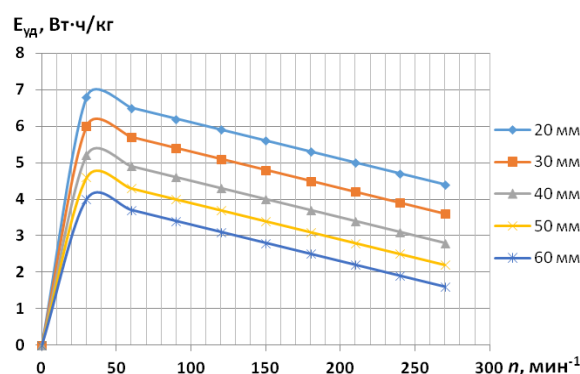


Рис. 4. Зависимость удельной энергоёмкости от частоты вращения гибкого шнека при его различных диаметрах

Для прогнозирования долговечности и оптимизации рабочих режимов шнекового транспортера исследована зависимость интенсивности износа от его основных геометрических и кинематических параметров (рис. 5).

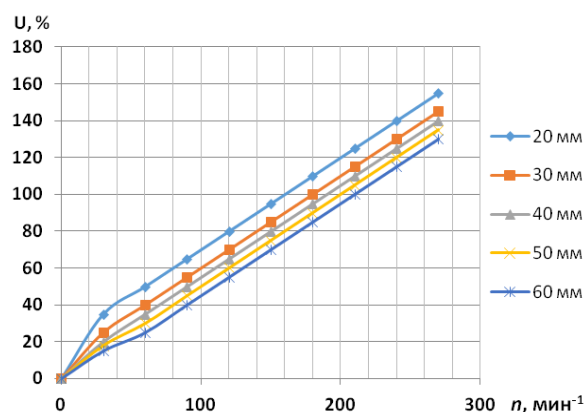


Рис. 5. Зависимость интенсивности износа рабочего органа от частоты вращения и диаметра гибкого шнека

Анализ графической зависимости позволяет установить, что интенсивность износа шнекового туконаправителя демонстрирует прямую пропорциональность частоте вращения шнека и обратную пропорциональность диаметру тукопровода. Наблюдаемый значительный рост износа (до 4,4 раза для тукопровода диаметром 20 мм при увеличении частоты вращения с 30 мин⁻¹ до 270 мин⁻¹) и его снижение с увеличением диаметра (например, с 95 % до 70 % при 150 мин⁻¹ для диаметров 20 мм и 60 мм соответственно) указывают на определяющую роль кинематических и геометрических параметров в процессе изнашивания. Таким образом, для существенного снижения интенсивности износа (более чем в 3,5 раза для тукопровода диаметром 40 мм) приоритетной стратегией является минимизация частоты вращения рабочего органа.

Обсуждение

Представленные результаты теоретического исследования подтверждают работоспособность и эффективность предложенной конструкции комбинированного сошника. Полученные зависимости производительности от частоты вращения и диаметра гибкого шнека (рис. 2) находятся в полном соответствии с классической теорией шнековых транспортеров [11] и подтверждают возможность регулирования нормы внесения в широком диапазоне, что является основным требованием для адаптации к различным агротехнологиям.

Выявленная значительная разница в транспортных характеристиках различных видов удобрений (рис. 3) объясняется их физико-механическими свойствами. Наибольшая производительность при работе с карбамидом связана с его высокой сыпучестью и стабильностью гранул. Снижение производительности при использовании аммиачной селитры и нитроаммофоски, отмеченное в наших расчетах, согласуется с данными литературных источников об их склонности к слеживанию и гигроскопичности [15, 16]. Низкий показатель для гранулированного помета, вероятно, связан не только с адгезией, но и с разрушением гранул в рабочем органе, что указывает на необходимость дополнительных экспериментальных исследований по работе с органическими удобрениями. Полученные данные подчеркивают важность учета типа удобрения при настройке режимов работы сеялки.

Важным преимуществом разработанной конструкции является ее высокая энергоэффективность. Рассчитанная потребляемая мощность (1,37 кВт) является низкой относительно аналогов и подтверждает возможность привода от ходовых колес. График изменения удельной энергоёмкости (рис. 4) наглядно показывает, что увеличение диаметра гибкого шнека является более эффективным способом снижения энергозатрат на единицу продукции, чем увеличение частоты его вращения. Это важный инженерный вывод для оптимизации конструкции.

Анализ зависимости интенсивности износа (рис. 5) выявил основное противоречие между производительностью и долговечностью. Минимизация частоты вращения, будучи приоритетом для снижения износа ограничивает производительность. Таким образом, оптимальные параметры шнека (диаметр 40 мм, частота вращения 100...200 мин⁻¹), выбранные на основе анализа рисунков 2 и 4, представляют собой компромиссное решение, обеспечивающее приемлемую производительность, высокую энергоэффективность и умеренный уровень износа.

Прогноз прибавки урожайности и экономии удобрений, сделанный на основе моделей (4) и (5), носит предварительный характер и требует подтверждения в полевых экспериментах. Однако он качественно согласуется с известными данными о преимуществах локального внесения удобрений [9, 20]. Основным ограничением данного исследования является его теоретико-расчетный характер. Для

окончательного подтверждения эксплуатационных и агрономических преимуществ необходимы изготовление опытного образца и его лабораторные и полевые исследования.

Заключение

Теоретически обоснована и разработана схема комбинированного сошника с активным гибким шнеком, обеспечивающим одновременный посев семян и стабильное локальное внесение различных типов удобрений на глубину до 15 см. Установлено, что производительность туконаправителя линейно зависит от частоты вращения шнека и в значительной степени (с изменением до 5,3 раза) – от его диаметра. Для удовлетворения агротехническим требованиям рациональными параметрами предлагаемого устройства являются диаметр гибкого шнека 40 мм и частота его вращения 100...200 мин⁻¹.

Расчёты подтвердили низкую энергоёмкость конструкции: потребляемая мощность не превышает 1,37 кВт, а увеличение диаметра гибкого шнека является наиболее эффективным способом снижения удельных энергозатрат. Установлено, что увеличение частоты его вращения с 30 мин⁻¹ до 270 мин⁻¹ приводит к увеличению износа в 4,4 раза для тукопровода диаметром 20 мм, в то время как увеличение диаметра гибкого шнека с 20 мм до 60 мм при 150 мин⁻¹ снижает относительный износ с 95 % до 70 %. Таким образом, приоритетной стратегией для кардинального снижения износа (более чем в 3,5 раза для диаметра гибкого шнека 40 мм) является оптимизация режима работы за счёт минимизации частоты вращения рабочего органа, что подтверждается результатами моделирования.

Применение нового сошника обеспечит возможный прирост урожайности на 10...15 % за счет повышения равномерности распределения удобрений.

Литература

1. Украинцева И. В. Роль отрасли животноводства в обеспечении продовольственной безопасности страны // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 95-4. С. 105-107. doi: 10.18411/trnio-03-2023-190
2. Khaliullin D. T., Belinsky A. V., Gayfullin I. Kh. Ways to increase the efficiency of using agricultural machinery in performing technological operations // Iop Conference Series Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1212. P. 12055. doi: 10.1088/1755-1315/1212/1/012055
3. Ксенофонов М. Ю., Ползиков Д. А. К вопросу о влиянии климатических изменений на развитие сельского хозяйства России в долгосрочной перспективе // Проблемы прогнозирования. 2020. № 3(180). С. 82-92.
4. Голубев А. В. Агропродовольственное импортозамещение через призму устойчивости сельского хозяйства // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2022. № 8. С. 2-8. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8.

5. Болодурина И. П., Соловьев С. А., Акимов С. С. Разработка системы поддержки принятия решений для повышения продуктивности молочного животноводства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20, № 2. С. 36-44. doi:10.14529/ctcr200204.

6. Зеленская Г. М., Зеленский Н. А. Роль бинарных посевов в накоплении влаги и сохранении плодородия почвы // Вестник Донского ГАУ. 2023. № 1(47). С. 28-36.

7. Designing the Sowing Unit of a Seeder with an Anchor Furrow Opener / I. D. Badretdinov, S. G. Mudarisov, E. R. Khasanov et al. // International Review on Modeling and Simulations. 2022. Vol. 15. No. 6. P. 388-395. doi: 10.15866/iremos.v15i6.22260.

8. Гапонов Н. В., Анишко М. Ю., Мисникова Н. В. Питательность зерносенажной массы бинарных ценозов узколистного люпина с овсом // Кормопроизводство. 2025. № 3. С. 17-21. doi: 10.30906/1562-0417-2025-3-17-21.

9. Шпанев А. М. Влияние минеральных удобрений на пространственное размещение сорных растений в посевах ярового ячменя // Плодородие. 2022. № 2(125). С. 8-12. doi: 10.25680/S19948603.2022.125.02.

10. Review and analysis of existing designs of seeding machines / A. I. Kim, M. V. Doudkin, V. V. Rogovsky [et al.] // Bulletin of D. Serikbayev EKTU. 2022. No. 4. P. 130-139. doi: 10.51885/1561-4212_2022_4_130.

11. Теоретическое обоснование параметров сошника сеялки / Д. М. Юмаев, Г. К. Рембалович, М. Ю. Костенко [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15, № 3. С. 178-185. doi: 10.36508/RSATU.2023.42.41.023.

12. Коэффициент трансформации ведущего крутящего момента встроенного колесного редуктора - дифференциала транспортно-технологических машин АПК / Ю. Ф. Казаков, Ю. Н. Батманов, Д. Л. Кириллов, В. Н. Батманов // Вестник Чувашского ГАУ. 2024. № 1(28). С. 160-167. doi: 10.48612/vch/fueh-npmr-4gku.

13. Методика расчета и проектирование дозатора-распределителя почвы / И. Х. Гайфуллин, Д. Т. Халиуллин, М. Н. Калимуллин и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2023. Т. 18. № 1(69). С. 45-51. doi: 10.12737/2073-0462-2023-45-51.

14. Обоснование и определение параметров бороздообразователя картофелесажалки / М. Н. Калимуллин, Д. Т. Халиуллин, И. Х. Гайфуллин, Р. Р. Хамитов // Вестник Казанского ГАУ. 2022. Т. 17, № 3(67). С. 84-89. doi: 10.12737/2073-0462-2022-88-93

15. Завалин А. А., Шафран С. А. Об эффективности использования аммиачной селитры и карбамида // Агрохимический вестник. 2024. № 6. С. 3-7. doi: 10.24412/1029-2551-2024-6-001

16. Технология возделывания ячменя в органическом земледелии в условиях лесостепи Поволжья / А. Х. Куликова, Г. В. Ермолаева, А. А. Пятова и др. //

Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3(71). С. 86-92. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-86-92

17. Артемьев А. А., Хвостов Е. Н. Урожайность и качество зерна озимой пшеницы на фоне разных доз удобрений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3(67). С. 6-12. doi: 10.18286/1816-4501-2024-3-6-12.

18. Еряшев А. П., Гурьянов А. М. Изменение продуктивности лугов при коренном улучшении на основе использования биологического азота // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3(63). С. 33-40. doi: 10.18286/1816-4501-2023-3-33-40.

19. Зубкова Т. В., Виноградов Д. В. Свойства органоминерального удобрения на основе куриного помета и применение его в технологии ярового рапса на семена // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1(53). С. 46-54. doi: 10.18286/1816-4501-2021-1-46-54.

20. Сравнительная агрономическая и экономическая эффективность традиционной и биологизированной технологий возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Среднего Поволжья / Г. В. Ермолаева, Е. А. Борисов, А. Х. Куликова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2(66). С. 6-12. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-6-12

References

1. Ukraintseva I. V. The Role of the Livestock Industry in Ensuring Food Security of the Country // Trends in the Development of Science and Education. 2023. No. 95-4. P. 105-107. doi: 10.18411/trnio-03-2023-190

2. Khaliullin D. T., Belinsky A. V., Gayfullin I. Kh. Ways to Increase the Efficiency of Using Agricultural Machinery in Performing Technological Operations // Iop Conference Series Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1212. P. 12055. doi: 10.1088/1755-1315/1212/1/012055

3. Ksenofontov M. Yu., Polzikov D. A. On the Impact of Climate Change on the Development of Agriculture in Russia in the Long-Term Perspective // Problems of Forecasting. 2020. No. 3 (180). P. 82-92.

4. Golubev A. V. Agri-food Import Substitution through the Prism of Agricultural Sustainability // Economics of Agricultural and Processing Enterprises. 2022. No. 8. P. 2-8. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8

5. Bolodurina I. P., Soloviev S. A., Akimov S. S. Development of a Decision Support System to Increase Dairy Farming Productivity // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics. 2020. Vol. 20. No. 2. P. 36-44. doi: 10.14529/ctcr200204

6. Zelenskaya G. M., Zelensky N. A. The Role of Binary Crops in Moisture Accumulation and Soil Fertility Maintenance // Bulletin of the Don State Agrarian University. 2023. No. 1(47). P. 28-36.

7. Designing the Sowing Unit of a Seeder with an Anchor Furrow Opener / I. D. Badretdinov, S. G. Mudarisov,

E. R. Khasanov, et al. // International Review on Modeling and Simulations. 2022. Vol. 15. No. 6. P. 388-395. doi: 10.15866/iremos.v15i6.22260

8. Gaponov N. V., Anishko M. Yu., Misnikova N. V. Nutritious value of grain silage mass of binary cenoses of narrow-leaved lupine with oats // Forage production. 2025. No. 3. P. 17-21. doi: 10.30906/1562-0417-2025-3-17-21

9. Shpanev A. M. Influence of mineral fertilizers on the spatial distribution of weeds in spring barley crops // Fertility. 2022. No. 2(125). P. 8-12. doi: 10.25680/S19948603.2022.125.02

10. Review and analysis of existing designs of seeding machines / A. I. Kim, M. V. Doudkin, V. V. Rogovsky, et al. // Bulletin of D. Serikbayev EKTU. 2022. No. 4. P. 130-139. doi: 10.51885/1561-4212_2022_4_130

11. Theoretical substantiation of seeder coulter parameters / D. M. Yumaev, G. K. Rembalovich, M. Yu. Kostenko, et al. // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023. Vol. 1. No. 3. P. 178-185. doi: 10.36508/RSATU.2023.42.41.023

12. The transformation ratio of the leading torque of the built-in wheel reducer - differential of transport and technological machines of the agro-industrial complex / Yu. F. Kazakov, Yu. N. Bat'manov, D. L. Kirillov, V. N. Bat'manov // Bulletin of the Chuvash State Agrarian University. 2024. No. 1 (28). P. 160-167. doi: 10.48612/vch/fueh-npmr-4gku

13. Methodology for calculating and designing a soil dispenser-distributor / I. Kh. Gaifullin, D. T. Khaliullin, M. N. Kalimullin, et al. // Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2023. Vol. 18. No. 1 (69). P. 45-51. doi: 10.12737/2073-0462-2023-45-51

14. Justification and determination of the parameters of the furrow former of the potato planter / M. N.

Kalimullin, D. T. Khaliullin, I. Kh. Gaifullin, R. R. Khamitov // Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2022. T. 17. No. 3(67). P. 84-89. doi: 10.12737/2073-0462-2022-88-93

15. Zavalin A. A., Shafran S. A. On the effectiveness of using ammonium nitrate and urea // Agrochemical Bulletin. 2024. No. 6. P. 3-7. doi: 10.24412/1029-2551-2024-6-001

16. Technology of barley cultivation in organic farming in the forest-steppe conditions of the Volga region / A. Kh. Kulikova, G. V. Ermolaeva, A. A. Pyatova, P. P. Smirnov // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 3 (71). P. 86-92. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-86-92

17. Artemyev A. A., Khvostov E. N. Yield and grain quality of winter wheat against the background of different doses of fertilizers // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2024. No. 3 (67). P. 6-12. doi: 10.18286/1816-4501-2024-3-6-12.

18. Eryashev A. P., Guryanov A. M. Change in meadow productivity with radical improvement based on the use of biological nitrogen // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2023. No. 3 (63). P. 33-40. doi: 10.18286/1816-4501-2023-3-33-40

19. Zubkova T. V., Vinogradov D. V. Properties of organomineral fertilizer based on chicken manure and its application in spring rapeseed technology // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2021. No. 1 (53). P. 46-54. doi: 10.18286/1816-4501-2021-1-46-54

20. Comparative agronomic and economic efficiency of traditional and biologized technologies for cultivating agricultural crops in the Middle Volga region / G. V. Ermolaeva, E. A. Borisov, A. Kh. Kulikova // Vestnik of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2024. No. 2 (66). P. 6-12. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-6-12

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-184-190

УДК 631.3

Определение эффективных параметров предпосевной ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой

М. С. Волхонов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технические системы»

С. Г. Лебедев✉, аспирант кафедры «Автомобили, тракторы и технические системы», преподаватель

ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

156530, Костромская область, п. Каравеево, ул. Учебный городок, д. 34

✉sg.lebedev@yandex.ru

Резюме. Исследование проводили с целью определения эффективных параметров ультразвука для предпосевной ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой, обеспечивающих увеличение урожайности фитомассы проростков без учета корней. Рассматриваемыми параметрами ультразвука являлись частота, удельная мощность и длительность воздействия. Анализ научной литературы свидетельствует о положительном влиянии ультразвука на рост растений при обработке семян. Однако обоснование эффективности рассматриваемых параметров ультразвука в данных исследованиях отсутствует, что затрудняет применимость предпосевной ультразвуковой обработки для различных сельскохозяйственных культур. Для проведения лабораторного исследования по влиянию параметров ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой на рост фитомассы без учета корней были разработаны опытное устройство и методика проведения трехфакторного эксперимента. Образцы семян тимopheевки луговой по 2 г обрабатывались в воде ультразвуком с различной частотой, удельной мощностью и длительностью воздействия, после чего проращивались в течение 15 дней в чашках Петри. После окончания проращивания осуществлялось взвешивание фитомассы без учета корней. В качестве контроля применялись необработанные образцы семян. По результатам трехфакторного эксперимента с использованием матрицы по плану Бокса-Бенкина было получено уравнение регрессии для ультразвуковой обработки. Его исследование показало, что наиболее эффективными параметрами ультразвука являются частота 2,4 МГц, удельная мощность 0,935 Вт/см², длительность воздействия 7 минут. Наибольший прирост фитомассы без учета корней по сравнению с контролем составил 17,82 %. Для полученного уравнения регрессии зависимость увеличения фитомассы проростков без учета корней по отношению к контролю на 99,3 % определяется выбранными параметрами ультразвука при обработке семян и на 70,3 % зависит от частоты, на 16,9 % – от удельной мощности, на 12,8 % – от длительности воздействия ультразвука. Полученные результаты можно использовать для совершенствования способов предпосевной обработки семян трав с применением ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, параметры ультразвука, урожайность кормовых трав, прирост фитомассы.

Для цитирования: Волхонов М. С., Лебедев С. Г. Определение эффективных параметров предпосевной ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 184-190. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-184-190

Determination of effective parameters of pre-sowing ultrasonic treatment of meadow timothy seeds

M. S. Volkhonov, S. G. Lebedev✉

FSBEI HE «Kostroma State Agricultural Academy»

156530, Kostroma region, Karavaevo settlement, Uchebny gorodok str., 34.

✉sg.lebedev@yandex.ru

Abstract. The study was carried out in order to determine the effective ultrasound parameters for pre-sowing ultrasonic treatment of meadow timothy seeds, which ensure an increase in the yield of phytomass of seedlings without taking into account the roots. The parameters of ultrasound under consideration were frequency, specific power, and duration of exposure. An analysis of the scientific literature indicates the positive effect of ultrasound on plant growth during seed treatment. However, there is no justification for the effectiveness of the ultrasound parameters under consideration in these studies, which complicates the applicability of pre-sowing ultrasound treatment for various crops. To conduct a laboratory study on the effect of the parameters of ultrasonic treatment of meadow timothy seeds on the growth of phytomass without taking into account the roots, an experimental device and a method for conducting a three-factor experiment were developed. Timothy meadow seed samples of 2 grams each were treated in water with ultrasound at various

frequencies, specific power and duration of exposure, after which they were germinated for 15 days in Petri dishes. After the end of germination, the phytomass was weighed without taking into account the roots. Untreated seed samples were used as a control. Based on the results of a three-factor experiment using a Box-Benkin matrix, a regression equation for ultrasonic treatment was obtained. His research has shown that the most effective ultrasound parameters are 2.4 MHz frequency and specific power. 0.935 W/cm², exposure time 7 minutes. The largest increase in phytomass excluding roots compared to the control was 17.82%. For the obtained regression equation, the dependence of the increase in the phytomass of seedlings without taking into account the roots in relation to the control by 99.3% is determined by the selected ultrasound parameters during seed treatment and depends by 70.3% on frequency, by 16.9% on specific power, and by 12.8% on the duration of ultrasound exposure. The results obtained can be used to improve the methods of pre-sowing treatment of grass seeds using ultrasound exposure.

Keywords: ultrasonic treatment, ultrasound parameters, yield of forage grasses, phytomass growth.

For citation: Volkhonov M. S., Lebedev S. G. Determination of effective parameters of pre-sowing ultrasonic treatment of meadow timothy seeds // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 184-190 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-184-190

Введение

Устойчивое развитие животноводства в нашей стране может быть осуществлено посредством укрепления отрасли кормопроизводства, которая связана с возделыванием большого разнообразия сельскохозяйственных культур. В настоящее время данная отрасль вынуждена решать целый комплекс задач, одной из которых является повышение продуктивности кормовых культур для полного устранения дефицита кормового белка [1].

В последнее десятилетие соотношение выращиваемых кормовых культур изменилось в сторону увеличения доли многолетних и однолетних кормовых трав до 67,3 % в 2020 г. [2]. При этом их продуктивность остается на невысоком уровне, не достигая показателей 1990 г. Урожайность кормовых трав в среднем по России как минимум вдвое ниже, чем в ведущих хозяйствах страны. Это связано как с низкой энерговооруженностью отрасли кормопроизводства и использованием устаревших технологий, так и с низким качеством семенного материала. Также наблюдается деградация пастбищ вследствие влияния антропогенных факторов и изменения климатических условий, о чем свидетельствуют исследования не только отечественных, но и европейских ученых [3]. Интенсификация технологий возделывания кормовых трав позволит увеличить их урожайность на 40...50 %, а также улучшить качество кормов [4].

Одним из приемов интенсивных технологий выращивания сельскохозяйственных культур является предпосевная обработка семян. Анализ эффективности известных способов предпосевной обработки семян свидетельствует о том, что их применение позволяет увеличить урожайность различных сельскохозяйственных культур в среднем на 35...40 % [5].

В последние годы появляется все больше исследований, посвященных физическим методам предпосевной обработки семян, одним из которых является использование ультразвука [6,7]. Воздействие ультразвуковых волн на семена в жидкой среде вызывает появление микротрещин и пор в оболочке семян, что способствует лучшему проникновению внутрь семени воды и кислорода. Предпосевная обработка семян перед посевом также эффективно изменяет структуру ферментных молекул, тем самым

способствуя катализу ферментов и ускоряя прорастание семян [8].

В научной литературе отечественных и зарубежных авторов имеется информация о благоприятном влиянии ультразвуковой обработки перед посевом на семена различных сельскохозяйственных культур.

Исследователи из Китая установили, что обработка ультразвуковыми волнами увлажненных семян риса повысила их всхожесть на 35,07 %, сырую массу растений на 54,21 %, активность каталазы на 11,74 %. Однако информация о параметрах ультразвука отсутствует [9]. Ученый из университета Фейсалабада представил результаты обработки семян сорго ультразвуком частотой 20 кГц, мощностью 750 Вт в течение 5 и 10 минут без обоснования выбора данных режимов обработки. Увеличивались всхожесть семян, высота побега и длина корня, общая масса и жизнеспособность проростков [10]. Обработка клубней картофеля перед посадкой ультразвуком с частотой 40 кГц и удельной мощностью 4,46 Вт/см² улучшает качество получаемого урожая [11]. Семена пшеницы, обработанные перед посевом ультразвуком частотой 42 кГц в течение 3...9 минут, увеличивают энергию прорастания на 46 %, всхожесть – на 35 %, ускоряют рост проростков на 33 % [12].

Вклад в развитие предпосевной ультразвуковой обработки семян внесли Волхонков М.С., Беляков М.М., Виноградова В.С., Зимин И.Б. В лабораторных экспериментах они установили, что воздействие на семена пшеницы ультразвуковыми волнами с частотой 26 кГц и мощностью излучения 240 Вт в течение одной минуты увеличило энергию прорастания на 8,58 %, а всхожесть – на 9,3 % [13]. Применение ультразвуковой обработки с частотой ультразвуковых колебаний 20...60 кГц, мощностью излучения до 240 Вт в течение 30...180 сек для семян пшеницы при выращивании микрорезлени способствовало увеличению количества получаемого сока из проростков на 8 % и сокращению срока выращивания биомассы с 10 до 6 дней [14].

Применение подобной обработки для семян ячменя в полевых условиях увеличило урожайность данной культуры на 54 % – с 11 ц/га до 17 ц/га [15]. Другие исследователи также отмечают активизацию биохимических и физиологических процессов в

семенах ячмени при их обработке ультразвуком с частотой 48 кГц, интенсивностью колебаний 42 Вт/см² и длительностью воздействия 480 секунд [16, 17]. При частоте 22 кГц, мощности 20...60 Вт и времени воздействия ультразвука 3...7 минут на семена ячменя в процессе их проращивания на 7 сутки наблюдалось увеличение содержания хлорофилла на 0,75 %, флавоноидов – на 0,45 %, аскорбиновой кислоты – на 1,9 мг/%, общих сахаров – на 1,1 % [18].

Известно положительное влияние ультразвука интенсивностью 0,4 и 1 Вт/см² без указания частоты при обработке семян чечевицы на рост корневой системы растений [19].

Обработка семян хлопка-сырца ультразвуком в течение 3...15 минут при частоте колебаний 35 кГц повышает урожайность культуры и улучшает текстильные свойства хлопкового волокна [20].

Анализ научной литературы свидетельствует о наличии разрозненных исследований по применению ультразвукового воздействия при предпосевной обработке семян. Не приведено подробного обоснования режимов ультразвуковой обработки с указанием интервалов варьирования параметров ультразвука. Это препятствует изучению механизма ультразвукового воздействия на семена и оценке перспективности способов предпосевной обработки с использованием акустической энергии для различных сельскохозяйственных культур с целью повышения их урожайности.

Цель исследования – разработать способ и устройство предпосевной ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой, определить эффективные параметры его работы.

Материалы и методы

Для определения наиболее эффективных параметров ультразвуковой обработки, в результате которой увеличивается прирост фитомассы проростков тимopheевки луговой без учета корней, был проведен лабораторный трехфакторный эксперимент. В качестве факторов предпосевной ультразвуковой обработки были выбраны такие параметры, как частота ультразвуковых колебаний, удельная мощность ультразвука, длительность обработки.

На основании результатов поисковых экспериментов были приняты уровни варьирования факторов ультразвуковой обработки (табл. 1).

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Уровень	Частота ультразвуковых колебаний f , МГц	Удельная мощность ультразвука P , Вт/см ²	Время обработки t , минут
Верхний (+1)	3,0	1,560	13
Нулевой (0)	2,4	0,935	7
Нижний (-1)	1,8	0,310	1

Для проведения лабораторного эксперимента по определению наиболее эффективных параметров ультразвука была составлена матрица по плану Бокса-Бенкина для трехфакторного эксперимента с трехуровневым варьированием факторов [21].

Разработано лабораторное устройство, реализующее способ ультразвуковой обработки семян, состоящее из блока питания 1, блока регулирования мощности 2, ультразвукового генератора 3, ваттметра 4 и ванны 5 с ультразвуковым излучателем 9 (рис. 1).

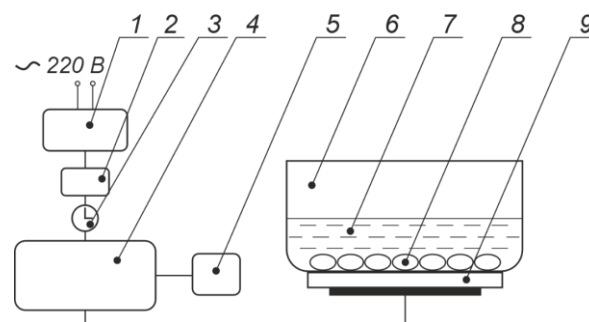


Рис. 1. Схема лабораторного устройства для ультразвуковой обработки семян:

1 – блок питания; 2 – блок регулирования мощности; 3 – таймер; 4 – ультразвуковой генератор; 5 – ваттметр; 6 – ванна; 7 – вода; 8 – семена; 9 – ультразвуковой излучатель

Методика проведения лабораторного эксперимента заключалась в следующем. Образцы семян тимopheевки луговой по 2 грамма в трехкратной повторности для каждого варианта замачивались в воде в течение одного часа, после чего производилась их обработка в воде ультразвуковыми волнами с частотой 1,8...3,0 МГц, удельной мощностью 0,310...1,560 Вт/см² и продолжительностью воздействия 1...13 минут согласно плану-матрице Бокса-Бенкина. В качестве контроля использовались необработанные образцы семян.

После обработки образцы семян тимopheевки проращивались на гидропонике в течение 15 дней в чашках Петри (рис. 2).

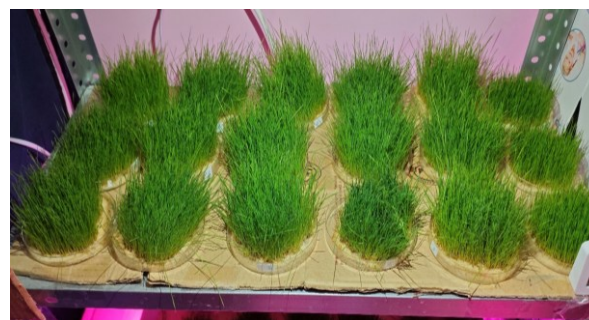


Рис. 2. Выращивание семян тимopheевки луговой на гидропонике

По истечении времени проращивания производилось взвешивание получившейся фитомассы проростков без учета корней.

Статистический анализ полученных результатов проведен с использованием t-критерия Стьюдента. Для составления уравнения регрессии предпосевной ультразвуковой обработки использован статистический пакет STATGRAPHICS Plus 5.0.

Результаты

Результаты лабораторного трехфакторного эксперимента по определению наиболее эффективных

параметров ультразвука для предпосевной обработки семян тимopheевки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние частоты, мощности и продолжительности воздействия ультразвуковых волн на величину фитомассы проростков тимopheевки луговой без учета корней

Номер опыта	Параметры обработки			Среднее значение фитомассы проростков без учета корней, г	Доверительные границы ошибки в процентах к среднему значению, %	Прирост фитомассы проростков без учета корней при применении обработки по отношению к контролю, %	Сопоставление фактического критерия $t_{факт}$ Стьюдента, и табличного, $t_{табл.}$
	Частота, МГц	Удельная мощность, Вт/см ²	Продолжительность обработки, мин.				
1	Контроль			6,99	2,15	–	–
2	3,0	1,560	7	6,52	3,87	-6,80	$8,5271 > 2,7764$
3	1,8	1,560	7	7,29	1,17	4,26	$9,0641 > 2,7764$
4	3,0	0,310	7	7,04	4,26	0,70	$0,7688 < 2,7764$
5	1,8	0,310	7	7,17	0,88	2,53	$5,7004 > 2,7764$
6	3,0	0,935	13	6,74	5,53	-3,67	$3,3646 > 2,7764$
7	1,8	0,935	13	7,23	1,11	3,33	$7,1884 > 2,7764$
8	3,0	0,935	1	6,89	2,48	-1,42	$2,2973 < 2,7764$
9	1,8	0,935	1	7,06	2,29	0,92	$1,5424 < 2,7764$
10	2,4	1,560	13	7,19	4,00	2,76	$3,1322 > 2,7764$
11	2,4	0,310	13	7,73	2,51	10,48	$15,7441 > 2,7764$
12	2,4	1,560	1	7,34	1,78	4,97	$9,1907 > 2,7764$
13	2,4	0,310	1	7,41	1,81	6,01	$10,9636 > 2,7764$
14	2,4	0,935	7	8,20	0,76	17,29	$39,0567 > 2,7764$
15	2,4	0,935	7	8,10	2,29	15,81	$24,4103 > 2,7764$
16	2,4	0,935	7	8,24	2,34	17,82	$26,8456 > 2,7764$

Максимальный положительный эффект наблюдается при обработке семян тимopheевки луговой ультразвуковыми волнами с частотой 2,4 МГц, удельной мощностью 0,935 Вт/см² и продолжительностью воздействия 7 минут, увеличение фитомассы проростков без корней составило 17,82 % относительно контрольных образцов.

Из таблицы 2 также следует, что увеличение частоты ультразвуковых колебаний до 3,0 МГц, удельной мощности до 1,560 Вт/см² и продолжительности воздействия до 13 минут приводит к угнетению развития растений, к снижению фитомассы проростков без корней по сравнению с контрольными образцами.

Статистический анализ с применением t-критерия Стьюдента для опытов из таблицы 2 под номерами 3, 5, 7, 10-16 свидетельствует об эффективности представленных режимов обработки, увеличивающих фитомассу проростков тимopheевки луговой без корней по сравнению с контролем.

Обработка семян в течение одной минуты и при низкой удельной мощности ультразвука 0,310 Вт/см² не оказывает эффекта на развитие проростков.

По результатам таблицы 2 с использованием статистического пакета STATGRAPHICS Plus 5.0 было

получено уравнение регрессии для фитомассы проростков без корней, получаемой при использовании ультразвуковой обработки семян:

$$m = -6,68 - 2,24 \cdot f^2 - 0,94 \cdot P^2 - 0,01 \cdot t^2 + 10,98 \cdot f + 2,81 \cdot P + 0,24 \cdot t - 0,43 \cdot f \cdot P - 0,02 \cdot f \cdot t - 0,03 \cdot P \cdot t$$

где m – фитомасса проростков без корней, г.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии показала, что все коэффициенты являются значимыми.

Эффективность ультразвуковой обработки семян перед посевом на 99,3 % зависит от частоты, удельной мощности и времени воздействия ультразвука, что подтверждает коэффициент детерминации ($R^2=99,3\%$).

Анализ относительного вклада параметров с использованием метода нормировки коэффициентов регрессии по диапазону изменения параметров показал, что при изменении частоты от 1,8 МГц до 3,0 МГц, удельной мощности от 0,310 Вт/см² до 1,560 Вт/см², длительности воздействия ультразвука от 1 минуты до 13 минут эффект от ультразвуковой обработки семян тимopheевки луговой на 70,3 % зависит от частоты, на 16,9 % – от удельной мощности, на 12,8 % – от длительности воздействия ультразвука.

Поверхности функции отклика в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний, удельной мощности и времени воздействия, построенные на основании уравнения регрессии, представлены на рисунках 3, 4 и 5.

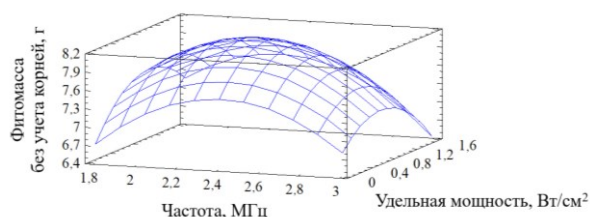


Рис. 3. Фитомасса проростков тимофеевки луговой без учета корней при ультразвуковой обработке семян в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний и удельной мощности ультразвука

Увеличение частоты с 1,8 МГц до 2,4 МГц и удельной мощности ультразвука с 0,310 Вт/см² до 0,935 Вт/см² вызывает рост фитомассы проростков без учета корней. При дальнейшем увеличении данных параметров наблюдается снижение эффективности обработки.

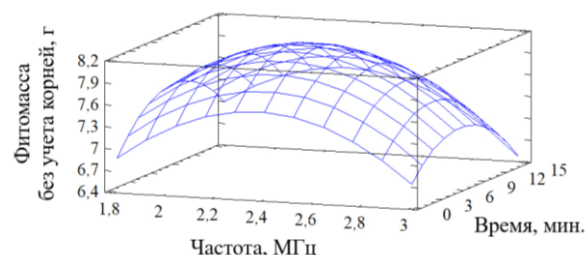


Рис. 4. Фитомасса проростков тимофеевки луговой без учета корней при ультразвуковой обработке семян в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний и длительности воздействия

В процессе обработки с повышением частоты от 1,8 МГц до 2,4 МГц и длительности воздействия ультразвука от 1 минуты до 7 минут наблюдается увеличение фитомассы проростков без учета корней. При дальнейшем увеличении данных параметров наблюдается снижение эффективности обработки вплоть до угнетения роста растений.

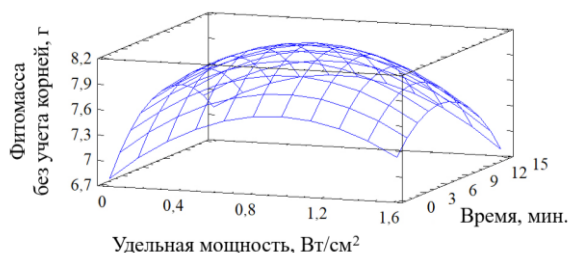


Рис. 5. Фитомасса проростков тимофеевки луговой без учета корней при ультразвуковой обработке семян в зависимости от удельной мощности ультразвука и длительности воздействия

С повышением удельной мощности от 0,310 Вт/см² до 0,935 Вт/см² и длительности воздействия ультразвука от 1 минуты до 7 минут наблюдается увеличение фитомассы проростков без учета корней. Дальнейшее увеличение данных параметров ультразвуковой обработки семян трав снижает ее эффективность и приводит к угнетению роста растений.

Графо-аналитическим методом установлено, что максимальный эффект от ультразвуковой обработки достигается при частоте 2,4 МГц, удельной мощности 0,935 Вт/см² и длительности обработки 7 минут.

Обсуждение

Одним из перспективных способов повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур является предпосевная обработка семян ультразвуковыми волнами. Для крупных семян в научной литературе известны следующие эффективные параметры предпосевной ультразвуковой обработки: для пшеницы – частота 20...60 кГц, мощность 240 Вт, время 3...9 минут [12, 13,14], для ячменя – частота 20...60 кГц, мощность 20...240 Вт, время 3...7 минут [15, 16, 17, 18]; для сорго – частота 20 кГц, мощность 750 Вт, время 5...10 минут [10]; для картофеля – частота 40 кГц, удельная мощность 4,46 Вт/см² [11]; для хлопка-сырца частота 35 кГц, время 3...15 минут [20]; для чечевицы – интенсивность 0,4...1 Вт/см² без указания частоты и длительности обработки [19].

Проведенное исследование показало, что для мелких семян эффективность ультразвуковой обработки на 70,3 % зависит от частоты, которая в 40 раз выше, чем для крупных семян. По нашему мнению, механизм воздействия ультразвука на мелкие семена схож с зерновыми культурами. Активизация роста происходит по причине улучшения водоудерживающей способности проростков, повышения концентрации клеточного сока и потенциального осмотического давления, большему накоплению хлорофилла в листьях [14].

Результаты исследования являются практически значимыми. Установлено, что эффективность предпосевной ультразвуковой обработки на 99,3 % зависит от частоты, удельной мощности и времени воздействия ультразвука. Полученные результаты можно использовать для совершенствования способов обработки мелкосемянных сельскохозяйственных культур перед посевом с применением акустической энергии для повышения их урожайности.

Заключение

Разработан способ обработки семян тимофеевки луговой в воде толщиной слоя менее 0,5 см ультразвуковыми волнами и устройство для его осуществления. Эффективность ультразвуковой обработки семян тимофеевки луговой перед посевом на 99,3 % зависит от частоты, удельной мощности и времени воздействия ультразвука. При этом результат обработки на 70,3 % определяется частотой, на 16,9 % – удельной мощностью, на 12,8 % – длительностью воздействия ультразвука. Определены эффективные параметры ультразвуковой обработки семян тимофеевки

луговой, увеличивающие фитомассу проростков без учета корней на 17,82 % относительно контроля, которыми являются частота 2,4 МГц, удельная мощность 0,935 Вт/см², длительность обработки 7 минут.

Литература

1. Исторические аспекты, состояние и перспективы развития семеноводства кормовых трав в России / В. Н. Золотарев, О. В. Трухан, П. И. Комахин, и др. // Кормопроизводство. 2022. № 7. С. 3-9.
2. Косолапов В. М., Чернявских В. И., Костенко С. И. Современное состояние и вызовы для отрасли кормопроизводства в России // Кормопроизводство. 2022. № 10. С. 3-8.
3. Grass and legume breeding matching the future needs of European grassland farming / O. A. Rognli, L. Pecetti, M. R. Kovi, et al. // Grass and Forage Science. – 2021. Т. 76. No. 2. P. 175-185. doi: 10.1111/gfs.12535
4. Косолапов В. М., Чернявских В. И. Кормопроизводство: состояние, проблемы и роль ФНЦ "ВИК им. В. Р. Вильямса" в их решении // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 4. С. 5-14. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_5
5. Волхонов М. С., Мамаева И. А., Беляков М. М. Классификация и определение эффективности известных способов предпосевной обработки семян // Вестник НГИЭИ. 2022. № 8(135). С. 7-19. doi: 10.24412/2227-9407-2022-8-7-19
6. Матусевич А. Е., Ланин А. А., Бормотов А. А. Анализ физических методов предпосевной обработки // Актуальные вопросы энергетики в АПК: материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Благовещенск, 15 декабря 2021 года. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет. 2021. С. 76-82.
7. Волхонов М. С., Мамаева И. А., Беляков М. М. Параметры ультразвуковой волны при предпосевной обработке зерна // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20, № 2(78). С. 64-71. doi:10.12737/2073-0462-2025-64-71. EDN BJBKZH.
8. Бахчевников О. Н., Брагинец А. В., Нозимов К. Ш. Перспективные физические методы стимулирования прорастания семян (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 7. С. 56-66. doi: 10.53859/02352451_2022_36_7_56
9. Effect of ultrasonic seed treatment on rice seedlings under waterlogging stress / S. Huang, Y. Jia, P. Liu, et al. // Chilean J. Agric. Res. 2020. Vol. 80(4). P. 561-571. doi: 10.4067/S0718-58392020000400561
10. Hassan S. Impact of Pre-Sowing Physical Treatments on The Seed Germination Behaviour of Sorghum (*Sorghum bicolor*) // IPS Journal of Nutrition and Food Science. 2023. Vol. 2. No. 2. P. 33-36.
11. Pszczółkowski P., Sawicka B., Barbaś P. Ultrasound in Chips Production: Enhancing Tuber Quality via Pre-Planting Seed Treatment // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 20. P. 10980. doi: 10.3390/app152010980
12. Mihaylova E., Marcheva M., Peruhov N. Ultrasound seed treatment for organic farming // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2021. Vol. 27. P. 78-84
13. Беляков М. М., Волхонов М. С. Влияние времени воздействия ультразвуковых колебаний на всхожесть и энергию прорастания семян пшеницы // Научные приоритеты АПК в России и за рубежом: Сборник статей 72-й международной научно-практической конференции, Караваево, 22 апреля 2021 года. Караваево: Костромская государственная сельскохозяйственная академия. 2021. С. 291-296.
14. Волхонов М. С., Виноградова В. С., Беляков М. М. Влияние ультразвуковых колебаний на качество и количество получаемого сока из ростков пшеницы // Аграрный вестник Верхневолжья. 2025. № 3(53). С. 143-149.
15. Волхонов М. С., Беляков М. М., Зимин И. Б. Влияние ультразвуковых колебаний на урожайность ячменя в полевых условиях // Аграрный вестник Верхневолжья. 2023. № 1(42). С. 67-74. doi: 10.35523/2307-5872-2023-42-1-67-74.
16. Мосяков М. А., Катаев Ю. В., Свиридов А. С. Выявление закономерностей биологического ответа семян ячменя на ультразвуковое воздействие // Агробиотехнология-2021: материалы международной научной конференции. Москва РГАУ МСХА, 2021. С. 367-372
17. Повышение посевных качеств семян ячменя / Н. В. Алдошин, А. В. Сибирев, А. И. Панов и др. // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 1 (38). С. 52-57. doi: 10.35523/2307-5872-2022-38-1-52-57
18. Скобкова И. С., Каменская Е. П. Влияние предпосевной обработки семян ячменя ультразвуком низкой интенсивности на биохимические показатели его ростков // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 22–24 мая 2013 года / Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет". Бийск: Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". 2013. С. 421-424.
19. Макеева И. Ю., Пузина Т. И., Болгова А. О. Влияние ультразвука разной интенсивности на антиоксидантный статус проростков чечевицы в условиях гипотермии // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 4(36). С. 14-23. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-2.
20. Влияние предпосевной обработки семян хлопчатника на качественные показатели хлопкового волокна / К. М. Расулова, С. Ш. Аъзамжонов, М. Т. Алимова, и др. // Вестник науки. 2022. Т. 4. № 6(51). С. 227-242.

21. Анисимов П. Н. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствии с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена // Вестник магистратуры. 2017. № 2-2(65). С. 29-31.

References

1. Historical aspects, status, and prospects for the development of forage grass seed production in Russia / V. N. Zolotarev, O. V. Trukhan, P. I. Komakhin, et al. // Forage production. 2022. No. 7. P. 3-9.
2. Kosolapov V. M., Chernyavskikh V. I., Kostenko S. I. Current state and challenges for the forage production industry in Russia // Forage production. 2022. No. 10. P. 3-8.
3. Grass and legume breeding matching the future needs of European grassland farming / O. A. Rognli, L. Pecetti, M. R. Kovi, et al. // Grass and Forage Science. – 2021. Vol. 76. No. 2. P. 175-185. doi: 10.1111/gfs.12535
4. Kosolapov V. M., Chernyavskikh V. I. Forage production: status, problems, and the role of the Williams Institute of Forage Production in solving them // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022. Vol. 36. No. 4. P. 5-14. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_5
5. Volkhonov M. S., Mamaeva I. A., Belyakov M. M. Classification and determination of the efficiency of known methods of pre-sowing seed treatment // Bulletin of NGIEI. 2022. No. 8(135). P. 7-19. doi: 10.24412/2227-9407-2022-8-7-19
6. Matusevich A. E., Lanin A. A., Bormotov A. A. Analysis of physical methods of pre-sowing treatment // Current issues of energy in the agro-industrial complex: materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference, Blagoveshchensk, December 15, 2021. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University. 2021. P. 76-82.
7. Volkhonov M. S., Mamaeva I. A., Belyakov M. M. Parameters of ultrasonic wave during pre-sowing treatment of grain // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2025. Vol. 20, No. 2(78). P. 64-71. doi:10.12737/2073-0462-2025-64-71. EDN BJBKZH.
8. Bakhchevnikov O. N., Braginets A. V., Nozimov K. Sh. Promising physical methods for stimulating seed germination (review) // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022. Vol. 36. No. 7. P. 56-66. doi: 10.53859/02352451_2022_36_7_56
9. Effect of ultrasonic seed treatment on rice seedlings under waterlogging stress / S. Huang, Y. Jia, P. Liu, et al. // Chilean J. Agric. Res. 2020. Vol. 80 (4). P. 561-571. doi: 10.4067/S0718-58392020000400561
10. Hassan S. Impact of Pre-Sowing Physical Treatments on The Seed Germination Behavior of Sorghum (*Sorghum bicolor*) // IPS Journal of Nutrition and Food Science. 2023. Vol. 2.No. 2. P. 33-36.
11. Pszczółkowski P., Sawicka B., Barbaś P. Ultrasound in Chips Production: Enhancing Tuber Quality via Pre-Planting Seed Treatment // Applied Sciences. 2025.Vol. 15.No. 20. P. 10980. doi: 10.3390/app152010980
12. Mihaylova E., Marcheva M., Peruhov N. Ultrasound seed treatment for organic farming // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2021. Vol. 27. P. 78-84
13. Belyakov M. M., Volkhonov M. S. Effect of exposure time to ultrasonic vibrations on the germination and vigor of wheat seeds // Scientific priorities of the agro-industrial complex in Russia and abroad: Collection of articles from the 72nd international scientific and practical conference, Karavaevo, April 22, 2021. Karavaevo: Kostroma State Agricultural Academy. 2021. P. 291-296.
14. Volkhonov M. S., Vinogradova V. S., Belyakov M. M. Influence of ultrasonic vibrations on the quality and quantity of juice obtained from wheat sprouts // Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2025. No. 3 (53). P. 143-149.
15. Volkhonov M. S., Belyakov M. M., Zimin I. B. Influence of ultrasonic vibrations on barley yield in field conditions // Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2023. No. 1 (42). P. 67-74. doi: 10.35523/2307-5872-2023-42-1-67-74.
16. Mosyakov M. A., Kataev Yu. V., Sviridov A. S. Identification of patterns of biological response of barley seeds to ultrasound exposure // Agrobiotechnology-2021: Proceedings of the international scientific conference. Moscow, Russian State Agrarian University, Moscow Agricultural Academy, 2021. P. 367-372
17. Improving the sowing qualities of barley seeds / N. V. Aldoshin, A. V. Sibirev, A. I. Panov, et al. // Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region. 2022. No. 1 (38). P. doi: 10.35523/2307-5872-2022-38-1-52-57
18. Skobkova I. S., Kamenskaya E. P. Effect of pre-sowing treatment of barley seeds with low-intensity ultrasound on the biochemical parameters of its sprouts // Technologies and equipment for the chemical, biotechnological and food industries: Proceedings of the VI All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation, Biysk, May 22–24, 2013 / Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University. Biysk: Biysk Technological Institute (branch) of the I. I. Polzunov Altai State Technical University. 2013. P. 421–424.
19. Makeeva I. Yu., Puzina T. I., Bolgova A. O. Effect of ultrasound of different intensities on the antioxidant status of lentil seedlings under hypothermia // Bulletin of higher educational institutions. Volga region. Natural sciences. 2021. No. 4 (36). P. 14-23. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-2.
20. Effect of pre-sowing treatment of cotton seeds on the quality indicators of cotton fiber / K. M. Rasulova, S. Sh. Azamzhonova, M. T. Alimova, et al. // Herald of science. 2022. Vol. 4. No. 6 (51). P. 227-242.
21. Anisimov P. N. On the use of experimental design methods in accordance with three-level Box-Behnken plans // Bulletin of the Magistracy. 2017. No. 2-2(65). P. 29-31.

Люминесцентная диагностика молока, загрязненного левофлоксацином**Г. Н. Самарин**[✉], доктор технических наук, главный научный сотрудник**М. В. Беляков**, доктор технических наук, главный научный сотрудник**И. Ю. Ефременков**, младший научный сотрудник

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., 5, стр. 1

[✉]samaringn@yandex.ru

Резюме. В кисломолочной продукции молоко с антибиотиками технологически недопустимо, так как в их присутствии ферментация продукта происходит медленно или вообще не происходит. При неправильном определении концентрации антибиотиков и попадании на поточно-технологическую линию приготовления пищевых продуктов вся партия готовой продукции может оказаться непригодной, поэтому качественный, дешевый, быстрый и своевременный тест на антибиотики в молоке-сырье защищает как здоровье покупателей, так и экономическую стабильность перерабатывающего предприятия. Цель исследования – изучение возможности фотOLUMИНЕСЦЕНТНОГО определения содержания левофлоксацина в молоке. Для экспериментов было использовано молоко 3,2 % жирности, искусственно загрязненное раствором, полученным из суспензии препарата «Лексофлон». Спектры возбуждения и люминесценции измерены на спектрофлуориметре CM2203. Выявлено 4 пика спектра возбуждения на длинах волн 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм. На данных пиках были измерены спектры люминесценции молока, которые при увеличении концентрации антибиотика количественно снижаются, некоторые из них имеют как однопиковую, так и многопиковую форму, также рассчитаны потоки люминесценции Φ_{290} , Φ_{324} , Φ_{360} , Φ_{445} . Излучение с длиной волны 290 нм целесообразно применять для полуколичественной диагностики антибиотика в молоке, а 445 нм для определения концентрации. Построена зависимость потока люминесценции Φ_{445} , о.е. от концентрации левофлоксацина в молоке C , мкг/см³ и аппроксимирована линейно с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,96$. На базе полученных результатов планируется разработать информационно-измерительный модуль бесконтактного определения наличия левофлоксацина, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока.

Ключевые слова: молоко, антибиотики, технические средства, оптический мониторинг, технологии.

Для цитирования: Самарин Г. Н., Беляков М. В., Ефременков И. Ю. Люминесцентная диагностика молока, загрязненного левофлоксацином // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 191-198. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-191-198

Luminescent diagnostics of milk contaminated with levofloxacin**G. N. Samarin**[✉], **M. V. Belyakov**, **I. Yu. Efremenko**

FSBEI Federal Scientific Agroengineering Center VIM

109428, Moscow, 1st Institutsky Ave., 5, Bldg. 1

[✉]samaringn@yandex.ru

Abstract. Milk containing antibiotics is technologically unacceptable in fermented milk products, as their presence either slows down fermentation or totally precludes it. If antibiotics concentrations are incorrectly determined and introduced into the food processing line, the entire batch of products may be unsuitable. Therefore, high-quality, affordable, rapid and timely testing for antibiotics in raw milk protects both the health of consumers and the economic stability of the processing enterprise. The objective of this study was to investigate the feasibility of photoluminescent specification of levofloxacin levels in milk. Milk with 3.2% fat content, artificially contaminated with a solution obtained from a suspension of "Lexoflon" medication, was used for the experiments. Excitation and luminescence spectra were measured on a CM2203 spectrofluorimeter. Four peaks of the excitation spectrum were revealed at wavelengths of 290 nm, 324 nm, 360 nm and 445 nm. The luminescence spectra of the milk were measured at these peaks; they quantitatively decrease with an increase in the concentration of the antibiotic, some of them having both single-peak and multi-peak shapes. The luminescence fluxes Φ_{290} , Φ_{324} , Φ_{360} and Φ_{445} were also calculated. Radiation with a wavelength of 290 nm is advisable to use for semi-quantitative diagnostics of the antibiotic in milk and 445 nm for determining the concentration. The dependence of the luminescence flux Φ_{445} , o.u. on the concentration of levofloxacin in milk C , $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ was determined and was approximated linearly with a specification coefficient of $R^2 = 0.96$. Based on the obtained results, it is planned to develop a contactless information and measurement module for levofloxacin detection, which can be integrated into milking and primary milk processing lines.

Keywords: milk, antibiotics, technical means, optical monitoring, technology.

For citation: Samarin G. N., Belyakov M. V., Efremenko I. Yu. Luminescent diagnostics of milk contaminated with levofloxacin // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 191-198 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-191-198

Введение

Внедрение инновационных технологий в сферу АПК – необходимое условие для повышения качества и количества выпускаемой продукции [1]. Повышение доли автоматизации в молочном животноводстве способно существенно повысить эффективность производства [2]. Также важной задачей остается поддержание здоровья сельскохозяйственных животных, для этого необходимо применять качественные кормление и условия содержания, применение лекарственных препаратов в случае болезни. Однако, применение лекарственных препаратов, если не соблюдать условия их выведения из организма животного, может вызвать такую проблему, как попадание остаточного количества антибиотиков в молочное сырье, что в свою очередь может вызвать серьезные проблемы как для предприятий, занимающиеся переработкой, так и для потребителей такой продукции. Для человека постоянное употребление микродоз антибиотиков, получаемых с продуктов питания, может вызвать проблемы с ЖКТ или серьезное отравление [3]. С точки зрения практики контроль наличия антибиотиков в пищевом сырье является сложной задачей из-за трудностей методического характера, также отсутствуют как таковые научно обоснованные количественные нормы допустимого их содержания [4]. Поэтому для повышения эффективности диагностики антибиотиков в пищевых продуктах необходимо существенно увеличивать не только чувствительность существующих методов, но и внедрение новых, а также добавление дополнительных точек контроля, например, на этапе доения коров, при первичной переработке, при транспортировке молока на завод.

Проводили исследование, в котором остаточное количество антибиотиков в молоке обнаруживали с помощью биочиповой технологии [5]. Данные технологии обладают высокой чувствительностью, однако, недостатком является сравнительно большое время измерения, а именно около 15...20 минут и при внедрении данной технологии, например, на этапе доения, может существенно увеличить временные промежутки технологии переработки. Также имеются исследования по обнаружению антибиотиков тетрациклиновой группы в коровьем молоке с применением экспресс-тестов [6]. Однако, экспресс-тесты являются одноразовыми и при большом количестве измеряемых объектов становятся дорогостоящими.

Определение линкомицина в молоке с помощью металлоорганического каркасного адсорбента на основе меди и жидкостной хроматографии-тандемной масс-спектрометрии [7] удалось обнаружить антибиотик с пределом обнаружения 0,013 нг/мл, но внедрить методы масс-спектрометрии из-за специфики их работы и физических процессов в существующие технологии переработки достаточно сложно, а также финансово затратно.

Датчик QCM с молекулярным отпечатком на основе полога ZIF-67@PDA для обнаружения

спарфлоксацина показал высокую эффективность [8]. Чувствительность данного метода в определении антибиотиков составляла 0,03 мкг/мл, однако для синтеза молекулярно импринтированного полимера ZIF-67@PDA необходима сложная пробоподготовка, персонал с высшим образованием в области химии, что значительно увеличивает время и стоимость измерений.

Использовали флуоресцентное определение ципрофлоксацина и хлорамфеникола в образцах молока с помощью эффекта внутреннего фильтра и фотоиндуцированного переноса электронов на основе наноразмерных стержневидных Eu-MOF [9]. Недостаток флуоресцентных методов заключается в том, что для наблюдения и регистрации флуоресценции необходимо в образец вводить флуоресцирующее вещество, что усложняет пробоподготовку, также наноразмерная стержневая металл-органическая структура требует дополнительных затрат на ее изготовление, калибровку и т.д.

Лазерно-индуцированные графеновые электроды, модифицированные молекулярно-импринтированным полимером для обнаружения тетрациклина в молоке и мясе [10]. Для реализации данного метода необходимы графеновые электроды, модифицированные наночастицами золота, а также молекулярно-импринтированный полимер в качестве синтетического элемента биораспознавания, данные технические решения имеют сложную интеграцию в существующие процессы переработки молока.

Использование новых электрохимических датчиков для обнаружения тетрациклинов в молоке в режиме реального времени [11]. Осуществляли обнаружение антибиотиков пенициллиновой группы в молоке с помощью фотолюминесценции [12].

Цель исследования – изучение возможности фотолюминесцентного определения содержания левофлоксацина в молоке, на базе которых планируется разработать информационно-измерительный модуль наличия данного антибиотика.

Материалы и методы

Для измерений было взято молоко агрофирмы «Мичурино» (Мичуринский муниципальный округ Тамбовской области). Массовая доля жира составляет 3,2 %, дата разлива молока 05.12.24. До измерений молоко хранилось в темном помещении при комнатной температуре 20 °С. Условия хранения соответствовали техническому регламенту Таможенного союза "О безопасности молока и молочной продукции" ТР ТС 033. Перед оптическими измерениями молоко тщательно перемешивали.

Для искусственного загрязнения молока сначала готовили стандартные растворы из суспензии «Лексофлон, 150 мг/мл», производитель: ООО «Нита-Фарм». Далее получали образцы молока объемом 100 см³ с концентрацией антибиотика 0,001 мкг/см³, 0,003 мкг/см³, 0,005 мкг/см³ и 0,010 мкг/см³.

Контрольное определение уровня антибиотиков осуществляли с помощью тест-наборов «BIOEASY 4in1

BSCT», основанных на иммунохроматографическом анализе с использованием коллоидного золота. Время анализа составляет 10 минут.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводили на спектрофлуориметре SM2203 (производство фирмы «Солар», Белоруссия) со специализированным программным обеспечением. Спектрофлуориметр включает в себя оптическую систему с источником излучения – импульсной ксеноновой лампой и приемником излучения – фотоэлектронным умножителем. Лампа работает в режиме коротких световых импульсов. Для выделения необходимого спектрального диапазона применяется монохроматор с вогнутой дифракционной решеткой, работающей в первом порядке дифракции.

Осуществляли измерения спектральных характеристик возбуждения (поглощения) $\eta(\lambda)$. Измерения проводили в диапазоне от 230...600 нм по методике, аналогичной [13]. Чувствительность приёмника излучения была выставлена средней, шаг сканирования составлял 1 нм. Измерение спектров возбуждения проводили при синхронном сканировании, при котором монохроматоры каналов возбуждения и регистрации люминесценции перестраиваются одновременно со сдвигом 60 нм.

Для измерения спектра люминесценции $\phi(\lambda)$ монохроматор возбуждения устанавливали на ту же длину волны, на которой наблюдается максимум спектра возбуждения при синхронном сканировании. Монохроматор регистрации люминесценции сканирует более длинноволновую область. Все

спектры были скорректированы на инструментальные искажения возбуждения с помощью программных средств с использованием эталонных кювет.

По полученным спектральным характеристикам определяли интегральную поглощательную способность H по формуле:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda' \quad (1)$$

$\eta(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения (поглощения) молока, выраженная в относительных единицах фотосигнала измерительного прибора (о. е.)

λ_1 – λ_2 – спектральные границы диапазона интегрирования по возбуждению.

Интегральные параметры спектров $\phi(\lambda)$, являющиеся потоками фотолюминесценции Φ , определяли по формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \phi(\lambda) d\lambda' \quad (2)$$

$\phi(\lambda)$ – спектральная характеристика люминесцентного излучения,

λ_3 – λ_4 – спектральные границы диапазона интегрирования по люминесценции.

Результаты

Для обнаружения максимальной оптической поглощательной способности молока в видимом диапазоне спектра на первом этапе были получены спектральные характеристики возбуждения молока (рис. 1).

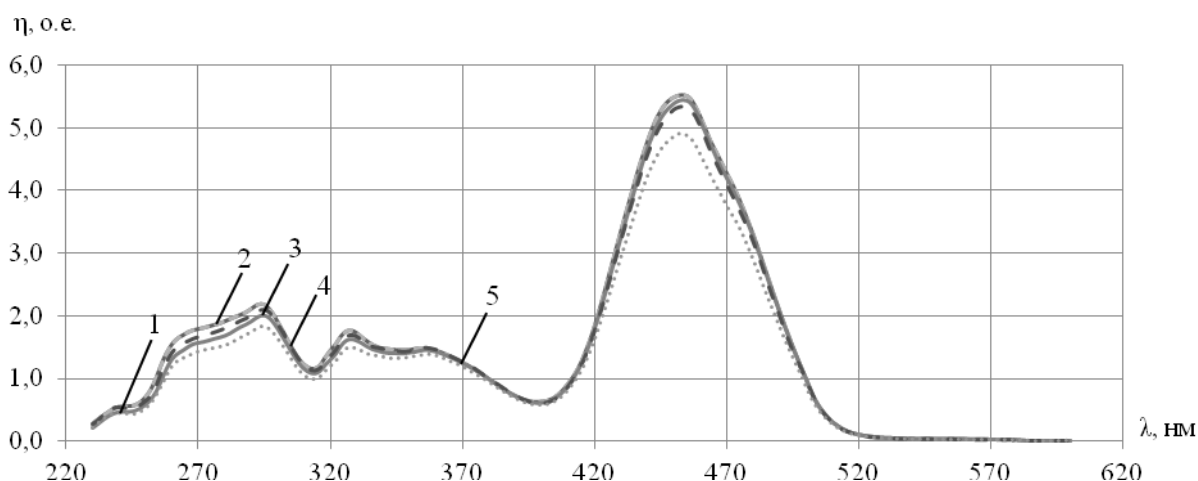


Рис. 1. Спектральные характеристики возбуждения молока с содержанием левофлоксацина: 1 – 0 мкг/см³, 2 – 0,001 мкг/см³, 3 – 0,003 мкг/см³, 4 – 0,005 мкг/см³, 5 – 0,010 мкг/см³

Молоко активно поглощает излучение в диапазоне 230...520 нм. К излучению в диапазоне 521...600 нм молоко не чувствительно. Также можно наблюдать 4 основных максимума на длинах волн: 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм, что подтверждает результаты, полученные авторами ранее [12]. От длины волны 230 нм до 290 нм поглощательная способность молока увеличивается до $\eta = 2,1$ о.е. С 291 нм до 310 нм, наблюдается снижение поглощения

излучения до $\eta = 1,1$ о.е. В диапазоне 310...400 нм максимум поглощения излучения несколько ниже и соответствует $\eta = 1,5$ о.е.

Наибольшая поглотительная способность приходится на диапазон длин волн от 420 нм до 490 нм, где максимум $\eta = 5,3$ о.е. Результаты расчетов интегральных параметров H по формуле (1) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Интегральные параметры спектров возбуждения молока, загрязненного левофлоксацином

Концентрация, мкг/см ³	Н, о.е. (для спектрального диапазона, нм)				
	230...310	310...340	340...400	400...520	230...600
0	114 ± 1	45 ± 1	70 ± 1	329 ± 1	561 ± 3
0,001	101 ± 8	42 ± 3	67 ± 5	322 ± 1	535 ± 32
0,003	101 ± 4	42 ± 1	68 ± 2	323 ± 3	536 ± 10
0,005	108 ± 4	43 ± 2	69 ± 3	316 ± 10	539 ± 21
0,010	92 ± 6	39 ± 2	65 ± 3	290 ± 5	489 ± 16

В спектральных диапазонах 230...310 нм, 340...400 нм, 400...520 нм при добавлении левофлоксацина в молоко наблюдается количественное изменение в интегральной поглотительной способности Н в меньшую сторону. При длинах волн 310...340 нм

существенных изменений Н не происходит. По полученным спектральным характеристикам возбуждения были измерены спектры люминесценции молока $\Phi(\lambda)$, (рис. 2).

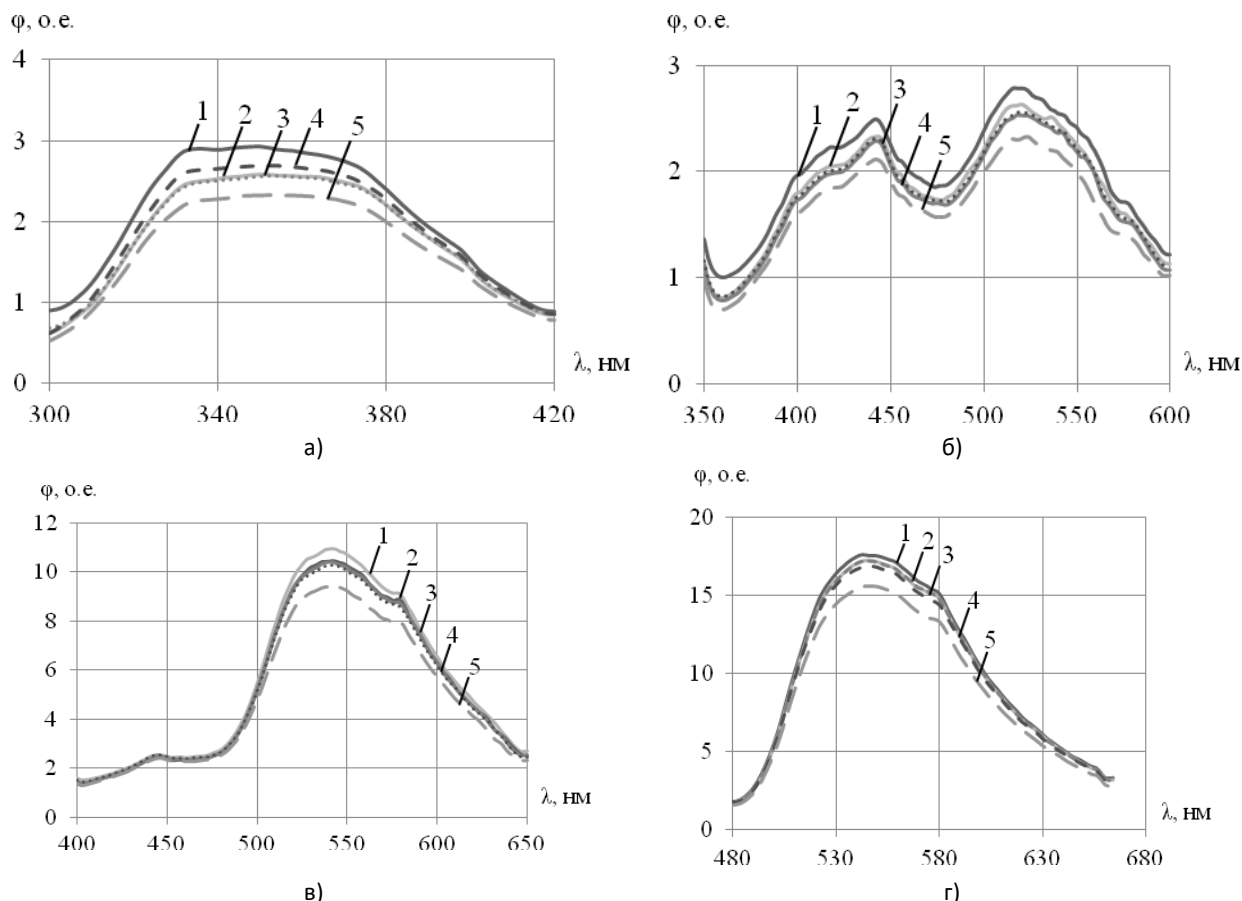


Рис. 2. Спектральные характеристики люминесценции молока при длинах волн возбуждения а) 290 нм, б) 324 нм, в) 360 нм, г) 445 нм при концентрации левофлоксацина: 1 – 0 мкг/см³, 2 – 0,001 мкг/см³, 3 – 0,003 мкг/см³, 4 – 0,005 мкг/см³, 5 – 0,010 мкг/см³

При длинах волн возбуждения 290 нм и 445 нм спектры люминесценции имеют одномодальную форму, при этом максимальная спектральная плотность потока люминесценции $\Phi_{\text{макс}}$ при $\lambda_{\text{в}} = 445$ больше и составляет 17,2 о.е., а при $\lambda_{\text{в}} = 290$ меньше и составляет $\Phi_{\text{макс}} = 2,9$ о.е.

У спектров при $\lambda_{\text{в}} = 324$ нм и $\lambda_{\text{в}} = 360$ нм отличительной особенностью является двумодальность, причем при $\lambda_{\text{в}} = 360$ нм – ярко выраженная.

При длине волны возбуждения 360 нм, первый максимум находится на 446 нм и имеет спектральную плотность потока люминесценции $\Phi = 2,38$ о.е., второй максимум находится на длине волны 540 нм

и имеет $\Phi_{\text{макс}}$ от 9,46 о.е. до 18,82 о.е. в зависимости от концентрации антибиотика в молоке, что в 4...5 раз больше по сравнению с первым максимумом. При $\lambda_{\text{в}} = 324$ нм максимумы спектрального потока люминесценции примерно равны и составляют от $\Phi = 2,1$ о.е. до 2,5 о.е. для длины волны 444 нм и от $\Phi = 2,3$ о.е. до 2,6 о.е. для $\lambda = 518$ нм в зависимости от содержания левофлоксацина, т.е. отличие в максимумах составляет около 4 %.

Результаты расчетов интегральных параметров Φ (в относительных единицах) и их погрешности для надежности $p=0,95$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Интегральные параметры спектров люминесценции молока, загрязненного левофлоксацином

Концентрация, мкг/см ³	Φ_{290} , о. е.	Φ_{324} , о. е.	Φ_{360} , о. е.	Φ_{445} , о. е.
0	254 ± 3	498 ± 7	1391 ± 14	1901 ± 11
0,001	225 ± 24	462 ± 42	1333 ± 107	1865 ± 128
0,003	224 ± 12	454 ± 13	1332 ± 26	1860 ± 27
0,005	232 ± 15	460 ± 31	1320 ± 73	1817 ± 80
0,010	204 ± 16	413 ± 21	1216 ± 45	1682 ± 47

Относительная погрешность определения потоков фотолюминесценции незагрязненного молока сравнительно невелика – 0,6...1,4 %, но она в разы возрастает при введении антибиотиков (табл. 2). При этом наибольшая относительная погрешность для концентрации $C=0,001$ мкг/см³. Это можно объяснить недостаточным уровнем концентрации для взаимодействия с составными частицами молока и изменением их люминесцентных свойств (концентрационное тушение люминесценции). Как следствие, люминесцируют как частицы, прореагировавшие с антибиотиками, так и непрореагировавшие, т. е. скорее всего, имеет место некое «пограничное состояние» взаимодействия излучения молока и антибиотиков.

Для длины возбуждения 445 нм относительная погрешность определения потока наименьшая и не

превышает 6,9 %, что можно объяснить самым большим уровнем фотосигнала. Для коротковолнового возбуждения 290 нм – наоборот, относительная погрешность наибольшая, а абсолютная – наименьшая.

Из табл. 2 следует, что потоки Φ_{290} , Φ_{324} , Φ_{360} , Φ_{445} уменьшаются с повышением концентрации антибиотиков в молоке. Однако для контроля наличия левофлоксацина предпочтительнее использовать поток люминесценции Φ_{290} , поскольку не происходит наложения доверительных интервалов потоков при концентрации антибиотика 0 мкг/см³ и 0,001 мкг/см³. Потоки люминесценции Φ_{324} , Φ_{360} , Φ_{445} также можно применять для отслеживания концентрации антибиотиков, но в тех случаях, где не нужна высокая точность при измерениях. Полученные зависимости $\Phi(C)$ представлены на рис. 3.

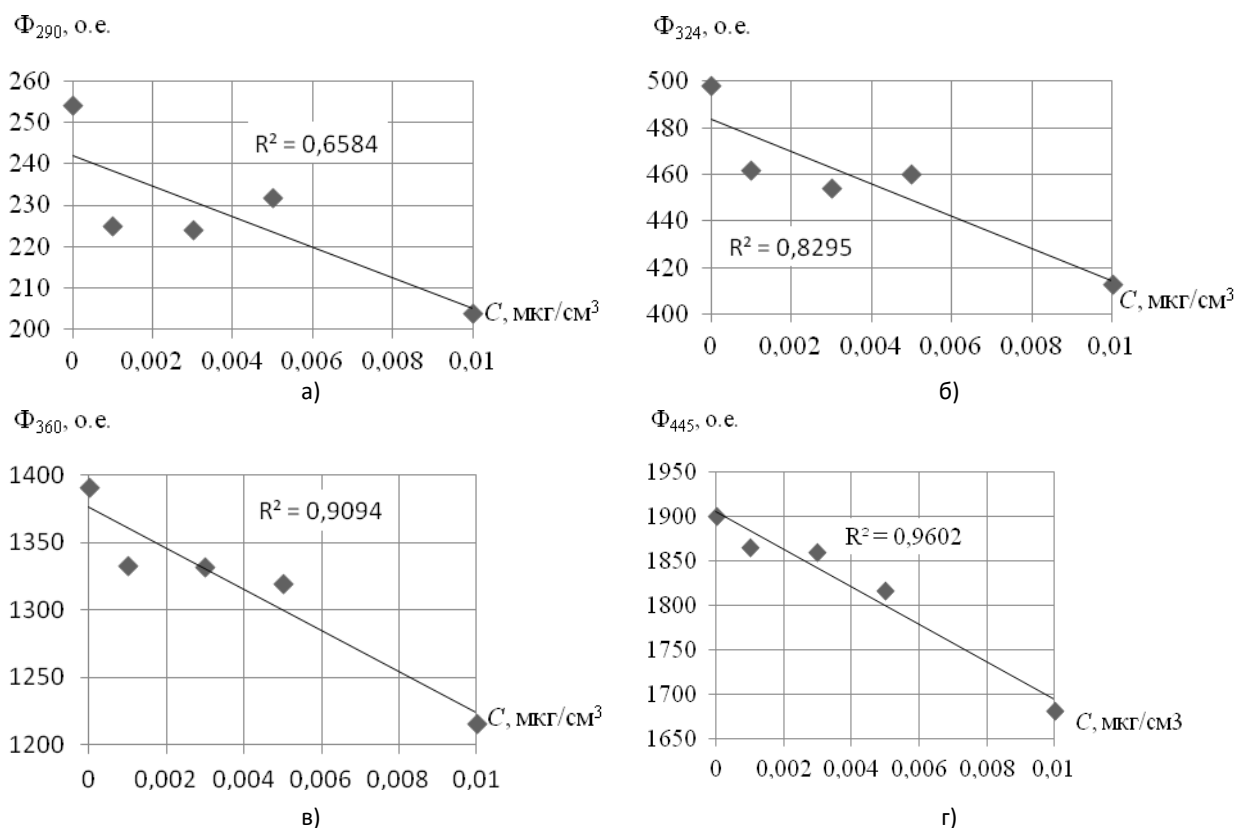


Рис. 3. Графики зависимости потоков люминесценции от концентрации антибиотиков в молоке при длине волны возбуждения: а) – 290 нм, б) – 324 нм, в) – 360 нм, г) – 445 нм

На основе полученных результатов может быть разработан информационно-измерительный модуль (ИИМ) количественного или полук количественного содержания левофлоксацина в молоке. Варианты интеграции ИИМ в поточно-технологические линии (ПТЛ) могут быть разнообразны.

Например, на рис. 4 представлен один из вариантов типовой ПТЛ доения коров и первичной обработки молока в коровнике на 400 голов (1) с доильным залом (3), который широко распространен в России и за рубежом [14-16]. ПТЛ первичной обработки молока представлена в стандартном исполнении: сбор (14), учет, очистка (10), охлаждение (9) и хранение молока (8), с последующей выгрузкой (7) его в

автоцистерну (6). Места установки ИИМ (5) выбраны не случайно, так как позволяют оперативно отсекают молоко, загрязнённое антибиотиками, из общего потока при помощи трехходового крана с исполнительным механизмом (13); контролировать наличие антибиотиков в молоке при сдаче молока на ферме и при приемке молока в автоцистерну.

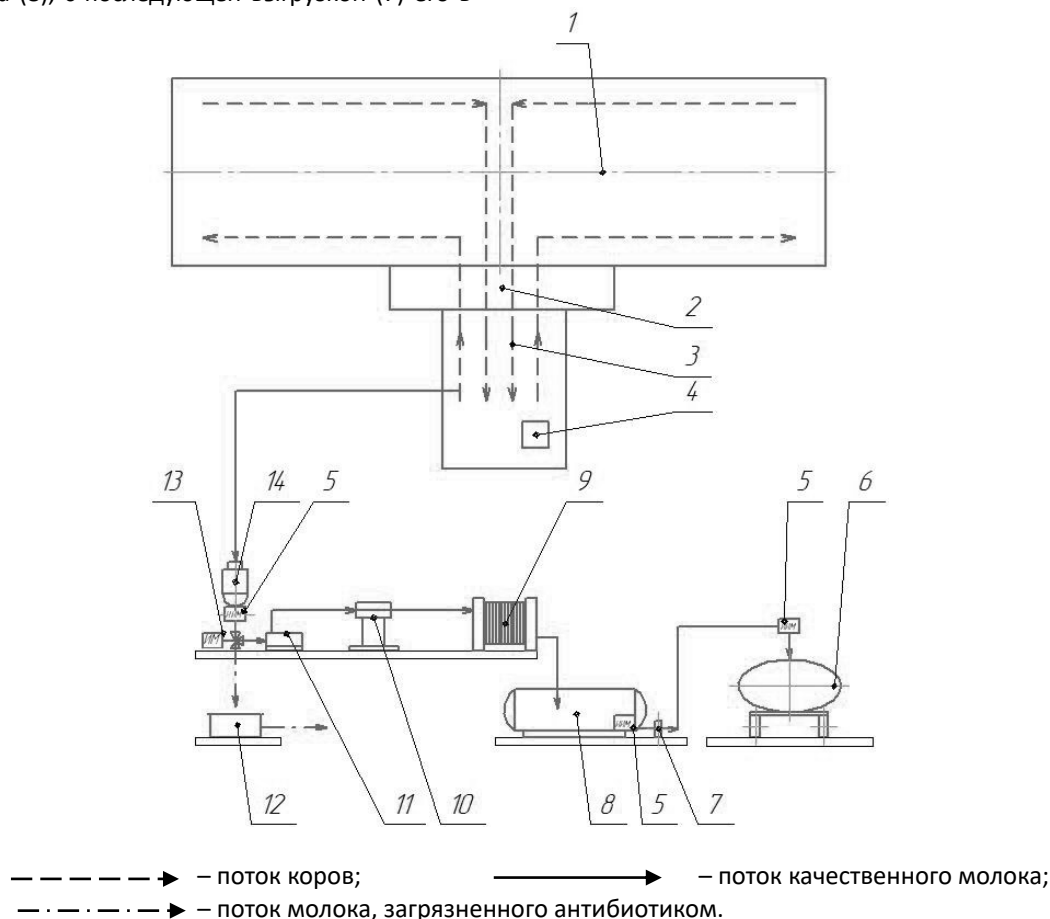


Рис. 4. Технологическая схема поточно-технологическая линия доения коров и первичной обработки молока: 1 – коровник на 400 голов; 2 – площадка преддоильная; 3 – доильный зал с доильной установкой; 4 – установка вакуумная; 5 – информационно-измерительный модуль; 6 – автоцистерна; 7 – насос молочный; 8 – резервуар-охладитель молока; 9 – охладитель молока пластинчатый; 10 – сепаратор-молокоочиститель; 11 – насос молочный; 12 – емкость для загрязненного молока; 13 – трехходовой кран с исполнительным механизмом; 14 – молокосорбник.

Обсуждение

Полученные спектры (рис. 1) объясняются мультикомпонентностью молока, которое в своем составе имеет белки, жиры, углеводы, макро- и микронутриенты. Максимум возбуждения при 290 нм может быть обусловлен присутствием триптофана [17]. Наличие пика при 324 нм может свидетельствовать о возбуждении пуриновых и пиримидиновых оснований, входящих в состав нуклеиновых кислот. Присутствие данных соединений в молоке обусловлено его белковым составом и клеточными элементами (ДНК, РНК), также данный максимум является флуоресценцией витамина А [18]. Пик 360 нм может быть связан с наличием в молоке нуклеотидов, белков и флавоноидов [19]. Пик

445 нм может характеризовать присутствие рибофлавина, а именно витамина В2 в молоке [20].

Графики зависимостей потока люминесценции молока от концентрации (рис. 3) имеют нисходящий тренд при увеличении содержания левофлоксацина в молоке. Следовательно, для регистрации факта наличия левофлоксацина минимальной концентрации (0,001 мг/см³) целесообразнее использовать возбуждение излучением 290 нм, т.е. применять полуколичественный анализ для разработки сигнализатора с наименьшей абсолютной погрешностью определения потока Φ_{290} . Более длинноволновое возбуждение 360 нм и, особенно, 445 нм следует применять для разработки методики и датчика фотолюминесцентного определения концентрации антибиотиков, где

регистрация минимальных концентраций антибиотиков не критична, но важно понимать, сколько антибиотиков в молоке. Возбуждение излучением 445 нм наиболее предпочтительно ввиду самого высокого фотосигнала, наименьшей относительной погрешности определения потока и наибольшей статистической достоверности линейной аппроксимации зависимости $\Phi_{445}(C)$, имеющей коэффициент детерминации 0,96. Уравнение регрессии для обратной зависимости $C(\Phi_{445})$:

$$C = -21099 \cdot \Phi_{445} + 1905,2 \quad (3)$$

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что результаты могут быть использованы для создания информационно-измерительного модуля, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока. Оптический принцип работы информационно-измерительного модуля соответствует передовым научно-исследовательским разработкам в области оптической техники и не имеет аналогов в мире.

Заключение

Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции чистого молока и молока, загрязненного левофлоксацином, имеют количественные различия, особенно при возбуждении излучением 290 нм и 445 нм. При увеличении концентрации антибиотиков снижаются потоки фотолюминесценции для всех исследованных длин волн возбуждения и увеличивается погрешность их определения. Ультрафиолетовое возбуждение 290 нм целесообразно использовать для полуколичественного определения наличия левофлоксацина в молоке, а возбуждение синим излучением 445 нм – для определения концентрации. Зависимость $\Phi_{445}(C)$ может быть статистически достоверно аппроксимирована линейной функцией и положена в основу разработки фотолюминесцентного датчика концентрации антибиотиков в молоке. Результаты могут быть использованы для создания информационно-измерительного модуля, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока.

Литература

1. Необходимость внедрения инновационных технологий в молочном животноводстве / Ф. Ф. Ситдииков, Б. Г. Эиганшин, Р. Р. Шайдуллин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. № 4. С. 69-74. doi: 10.12737/2073-0462-2020-69-74
2. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. № 4. С. 6-10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10
3. Проблемы контроля и методы обнаружения остаточного количества антибактериальных веществ в молоке и молочной продукции / Г. М. Горяинова, Е. А. Денисова Л. В. Арсеньева и др. // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2020. № 2. С. 165-169. doi: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202002007

4. Свириденко Г. М. Проблемы организации системного контроля антибиотиков в молоке и молочных продуктах // Молочная промышленность. 2020. № 8. С. 8-12. doi: 10.31515/1019-8946-2020-08-8-12
5. Попов П. А. Обнаружение остаточных концентраций антибиотиков в молоке с помощью биочиповой технологии // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2020. № 3 (35). С. 304-312. doi: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202003004
6. Абдусаломова Д. О., Азизов О. Т. Определение остаточных количеств антибиотиков тетрациклиновой группы в коровьем молоке с применением экспресс-тестов // Universum: технические науки. 2024. № 3-4 (120). С. 40-44. doi: 10.32743/UniTech.2024.120.3.17047
7. Determination of Lincomycin in Milk Using Cu-Based Metal-Organic Framework Adsorbent and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. / H. Li, J. Wu, J. Bai, et al. // Molecules. 2023. Vol. 28(14). P. 5307. doi: 10.3390/molecules28145307
8. Molecularly Imprinted QCM Sensor Based on Hollow ZIF-67@PDA for Sparfloxacin Detection. / S. Liao, L. Wang, C. Chen, et al. // Electronics. 2024. Vol. 13(23). P. 4799. doi: 10.3390/electronics13234799
9. Fluorescent Sensing of Ciprofloxacin and Chloramphenicol in Milk Samples via Inner Filter Effect and Photoinduced Electron Transfer Based on Nanosized Rod-Shaped Eu-MOF. / X. Yue, C. Wu, Z. Zhou, et al. // Foods. 2022. Vol. 11(19). P. 3138. doi: 10.3390/foods11193138
10. Laser-Induced Graphene Electrodes Modified with a Molecularly Imprinted Polymer for Detection of Tetracycline in Milk and Meat / B. D. Abera, I. Ortiz-Gomez, B. Shkodra, et al. // Sensors. 2022. Vol. 22(1). P. 269. doi: 10.3390/s22010269
11. Emerging Electrochemical Sensors for Real-Time Detection of Tetracyclines in Milk. / M. R. Raykova, A. C. Ward, D.K. Corrigan, et al. // Biosensors. 2021. Vol. 11(7). doi: 10.3390/bios11070232
12. Обнаружение антибиотиков в молоке по его фотолюминесцентным свойствам / Г. Н. Самарин, М. В. Беляков, И. Ю. Ефременков и др. // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. № 1. С. 10-16. doi: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16
13. Control of milk acidity by photoluminescence / A. S. Dorokhov, G. N. Samarina, A. S. Kudryavtsev, et al. // International Journal of Food Science and Technology. 2023. Vol. 58(1). doi: 10.1111/ijfs.16195
14. Коршунов А. Б. Повышение эффективности первичной обработки молока на фермах // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 2. С. 34-40. doi:10.26897/2687-1149-2022-2-34-40
15. Кирсанов В. В. Направления развития искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 3. С. 15-22. doi:10.26897/2687-1149-2025-3-15-22
16. Мохов Б. П., Наумова В. В. Влияние среды и наследственности на реализацию потенциала мясной продуктивности крупного рогатого скота // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной

академии. 2025. №2 (70). С. 173-180. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-173-180

17. The effect of heat treatment on the front-face fluorescence spectrum of tryptophan in skim milk / N. Ayala, A. Zamora, A. Rinnan, et al. // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 92. P. 103. doi: 10.1016/j.jfca.2020.103569.

18. Kamal M., Karoui R. Monitoring of mild heat treatment of camel milk by front-face fluorescence spectroscopy // *Food Science and Technology*. 2017. Vol. 79. P. 586–593. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.013

19. Структурные группы природных фосфолипидов, участвующие в образовании комплексов с флавоноидами / Л. Н. Шишкина, М.В. Козлов, Т. В. Константинова и др. // *Химическая физика*. 2023. Т. 42. № 1. С. 28–34. doi: 10.31857/S0207401X23010107

20. Термодеструкция рибофлавина в различных агрегатных состояниях / С. Астанов, М. З. Шарипов, А. Р. Файзуллаев и др. // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81. № 1. С. 40–45.

References

1. The need to implement innovative technologies in dairy farming / F. F. Sitdikov, B. G. Eiganshin, R. R. Shaidullin, et al. // *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. No. 4. P. 69-74. doi: 10.12737/2073-0462-2020-69-74

2. Lobachevsky Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic technical means for agriculture // *Farm Machinery and Technologies*. 2021. No. 4. P. 6-10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10

3. Problems of control and methods for detecting residual amounts of antibacterial substances in milk and dairy products / G. M. Goryainova, E. A. Denisova, L. V. Arsenyeva, et al. // *Russian Journal of Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2020. No. 2. P. 165-169. doi: 10.36871/vet.san.hygiene.ecol.202002007

4. Sviridenko G. M. Problems of organization of systematic control of antibiotics in milk and dairy products // *Dairy Industry*. 2020. No. 8. P. 8-12. doi: 10.31515/1019-8946-2020-08-8-12

5. Popov P. A. Detection of residual concentrations of antibiotics in milk using biochip technology // *Russian Journal of Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2020. No. 3 (35). P. 304-312. doi: 10.36871/vet.san.hygiene.ecol.202003004

6. Abdusalomova D. O., Azizov O. T. Specification of residual quantities of tetracycline antibiotics in milk of cows using rapid tests // *Universum: technical sciences*. 2024. No. 3-4 (120). P. 40-44. doi: 10.32743/UniTech.2024.120.3.17047.

7. Determination of Lincomycin in Milk Using Cu-Based Metal-Organic Framework Adsorbent and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. / H. Li, J. Wu, J. Bai, et al. // *Molecules*. 2023. Vol. 28 (14). P. 5307. doi: 10.3390/molecules28145307

8. Molecularly Imprinted QCM Sensor Based on Hollow ZIF-67@PDA for Sparfloxacin Detection. / S. Liao, L. Wang,

C. Chen, et al. // *Electronics*. 2024. Vol. 13(23). P. 4799. doi: 10.3390/electronics13234799

9. Fluorescent Sensing of Ciprofloxacin and Chloramphenicol in Milk Samples via Inner Filter Effect and Photoinduced Electron Transfer Based on Nanosized Rod-Shaped Eu-MOF. / X. Yue, C. Wu, Z. Zhou, et al. // *Foods*. 2022. Vol. 11(19). P. 3138. doi: 10.3390/foods11193138

10. Laser-Induced Graphene Electrodes Modified with a Molecularly Imprinted Polymer for Detection of Tetracycline in Milk and Meat / B. D. Abera, I. Ortiz-Gomez, B. Shkodra, et al. // *Sensors*. 2022. Vol. 22(1). P. 269. doi: 10.3390/s22010269

11. Emerging Electrochemical Sensors for Real-Time Detection of Tetracyclines in Milk. / M. R. Raykova, A. C. Ward, D.K. Corrigan, et al. // *Biosensors*. 2021. Vol. 11(7). doi: 10.3390/bios11070232

12. Detection of antibiotics in milk by its photoluminescent properties / G. N. Samarin, M. V. Belyakov, I. Yu. Efremenko, et al. // *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2024. No. 1. P. 10-16. doi: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16

13. Control of milk acidity by photoluminescence / A. S. Dorokhov, G. N. Samarin, A. S. Kudryavtsev, et al. // *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 58(1). doi: 10.1111/ijfs.16195

14. Korshunov A. B. Improvement of the efficiency of primary milk processing on farms // *Agroengineering*. 2022. Vol. 24. No. 2. P. 34-40. doi:10.26897/2687-1149-2022-2-34-40

15. Kirsanov V. V. Directions for development of Artificial Intelligence in biomachine systems for animal husbandry // *Agroengineering*. 2025. Vol. 27. No. 3. P. 15-22. doi:10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

16. Mokhov B. P., Naumova V. V. The Influence of environment and heredity on the realization of the potential of meat productivity of cattle // *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025. No. 2 (70). P. 173-180. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-173-180

17. The effect of heat treatment on the front-face fluorescence spectrum of tryptophan in skim milk / N. Ayala, A. Zamora, A. Rinnan, et al. // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 92. P. 103. doi: 10.1016/j.jfca.2020.103569.

18. Monitoring of mild heat treatment of camel milk by front-face fluorescence spectroscopy / M. Kamal, R. Karoui // *Food Science and Technology*. 2017. Vol. 79. P. 586-593. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.013.

19. Structural groups of natural phospholipids involved in formation of complexes with flavonoids / L. N. Shishkina, M. V. Kozlov, T. V. Konstantinova, et al. // *Chemical Physics*. 2023. Vol. 42. No. 1. P. 28-34. doi: 10.31857/S0207401X23010107

20. Thermal destruction of riboflavin in various states of aggregation / S. Aстанов, M. Z. Sharipov, A. R. Fayzullaev, et al. // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2014. Vol. 81. No. 1. P. 40-45.

Обоснование структуры установки для электроимпульсной обработки объектов растительного происхождения

И. В. Юдаев✉, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение»

Ю. В. Даус, доктор технических наук, доцент кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии»

Р. Г. Кокурин, инженер-проектировщик, соискатель

ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ им. И.Т. Трубилина»

350044 Краснодарский край, г Краснодар, ул. Калинина, д. 13

✉etsh1965@mail.ru

Резюме. На сегодняшний день используются разнообразные электротехнологические операции для улучшения процессов в перерабатывающей промышленности и сельском хозяйстве за счет предварительной подготовки растительного сырья и материалов, а также для достижения запланированных результатов в агротехнологиях. К такого рода операциям относится и электроимпульсная обработка, которая позволяет уменьшить время сушки плодов, ягод, бахчевых культур и др.; сохранить питательные вещества при заготовке кормовых трав; увеличить выход сока; добиться повышения извлечения полезных компонентов из растительных лекарственных материалов; уничтожить сорняки, вредную микрофлору и болезни растений; дезинфицировать получаемую продукцию и т.д. Одним из сдерживающих факторов для широкого внедрения этих операций является отсутствие промышленно выпускаемых электротехнологических установок. Поэтому экспериментаторам приходится разрабатывать как источники высокого напряжения, так и блоки формирования импульсов. Цель исследований – обоснование для практического применения и проведения исследований варианта реализации электротехнологической установки и проектирование её электрической части. Разработанная структура отличается не только сравнительно минимальными финансовыми затратами, но и стабильностью формирования воздействующих импульсов, простотой конструкции и легкостью управления. Установка собрана по блочно-модульному типу, что позволяет не только упростить ее компоновку, но и повысить ремонтпригодность и техническое обслуживание. Проверка в лабораторных условиях показала её стабильную работу без сбоев при различных режимах, что свидетельствует о хорошо продуманной структуре и согласовании блоков. Проведенные исследования подтвердили возможность достижения при ее эксплуатации высокой технологической эффективности. Так, например, выход сока и мякоти из яблочного сырья при фиксированном давлении на образец удалось увеличить с 0,22 г. до 6,24 г из образца массой 7,03 г. Но вместе с тем предстоит доработать электрическую часть установки для получения более эффективно воздействующих прямоугольных импульсов, что на наш взгляд, позволит организовать более глубокое необратимое повреждение внутриклеточных компонентов растительных объектов.

Ключевые слова: электроимпульсная обработка; объекты растительного происхождения; электротехнологическая установка; блок управления; блок коммутатора; модули установки; камера обработки

Для цитирования: Юдаев И. В., Даус Ю. В., Кокурин Р. Г., Обоснование структуры установки для электроимпульсной обработки объектов растительного происхождения // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 199-208. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-199-208

Justification of the structure of the installation for electric pulse processing of plant origin objects

I. V. Yudaev✉, **Yu. V. Daus**, **R. G. Kokurin**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin"

350044, Krasnodar Region, Krasnodar, Kalinina St., 13

✉etsh1965@mail.ru

Abstract. Today, a variety of electro-technological operations are used to improve processes in the processing industry and agriculture through the preliminary preparation of plant raw materials and supplies, as well as to achieve the planned results in agricultural technologies. These include electric pulse processing, which reduces the drying time of fruits, berries, melons, etc.; preserves nutrients during the harvesting of forage grasses; increases juice yield; achieves increased extraction of useful components from herbal medicinal materials; eliminates weeds, harmful microflora, and plant diseases; disinfects the resulting products, etc. One of the limiting factors for the widespread implementation of these operations is the lack of industrially produced electro-technological units. Therefore, experimenters need to develop both high-voltage sources and pulse generation units. The purpose of the research is to substantiate the practical application and conduct research of the implementation option of the electro-technological unit and the design of its electrical component. The designed structure is distinguished not only by comparatively minimal financial costs, but also by the stability of the

formation of the acting impulses, a simple design, and ease of control. The unit is assembled using a modular design, which not only simplifies its layout but also improves reparability and maintenance. Laboratory testing demonstrated its stable, repair-free exploitation under various operating conditions, demonstrating the well-designed structure and coordination of its modules. Conducted studies confirmed the feasibility of achieving high technological efficiency. For example, the yield of juice and pulp from apple raw materials under a fixed sample pressure was increased from 0.22 g to 6.24 g from a 7.03 g sample. However, the electrical component of the unit requires further refinement to generate more effective rectangular impulses, which, in our opinion, will allow for deeper, irreversible damage to the intracellular components of plant materials during electrical processing.

Keywords: electric pulse processing; objects of plant origin; electrotechnological unit; control unit; switch unit; installation modules; processing chamber.

For citation: Yudaev I. V., Daus Yu. V., Kokurin R. G. Justification of the structure of the installation for electric pulse treatment of plant-based objects // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 199-208 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-199-208

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках научного проекта РНФ № 25-29-01005 «Электроимпульсная, энергомалозатратная, экологически чистая агробιοεлектротехнология борьбы с сорной и нежелательной растительностью для систем ведения органического садоводства и виноградарства»

Введение

Развитие сельского хозяйства невозможно себе представить без внедрения в технологические процессы и операции систем автоматизированного контроля за их протеканием, оценки их параметров и режимов, цифровых систем сопряжения получаемой и передаваемой информации, а также технологически обоснованной замены традиционного оборудования на новые современные технические решения [1, 2]. Сегодня разрабатываются и внедряются нетрадиционные для уже апробированных технологических операций в перерабатывающей промышленности и сельскохозяйственном производстве технологии и технические средства их осуществляющие, которые характеризуются высокой эффективностью, экономической привлекательностью, экологической и продовольственной безопасностью, к которым относится и процесс электроимпульсного воздействия на объекты растительного происхождения [3, 4].

Электроимпульсные воздействия на растения позволяют успешно бороться с сорной и нежелательной растительностью, организовывать досушивание корзинок подсолнечника и листьев табака в естественных условиях их произрастания, позволяя снизить совокупные затраты на их переработку [4, 5].

Добиться положительного эффекта, воздействуя на сырьё и материал, можно осуществив электроимпульсный плазмолиз. Он представляет собой хорошо известный из курса физиологии растений процесс плазмолиза клетки, т.е. отделение протопласта клетки от оболочки под действием на последнюю гипертонического раствора, который в рассматриваемом случае происходит при воздействии на нее высоковольтного импульса, в результате чего мембрана теряет свои полупроницаемые свойства – межклеточная и внутриклеточная жидкости смешиваются и могут быть с минимальными энергетическими затратами извлечены из растительного материала или сырья. В результате этого после электрообработки происходит максимально быстрое извлечение влаги из внутриклеточных компонентов при последующей

сушке фруктов, овощей, бахчевых культур [6, 7]; растительное сырьё лучше подготавливается для последующей переработки [8, 9]; возникает возможность получать методом механического прессования дополнительные объёмы сока, нектара и других сокодержавших продуктов [10, 11]; максимально выгодно и менее затратно извлекаются полезные и лекарственные компоненты из растительных материалов [12, 13] и т.п.

Серьезной же проблемой для проведения исследований по изучению процесса электроимпульсной обработки растительных объектов является отсутствие на рынке специализированного оборудования. Поэтому зачастую в стране и за рубежом исследователи, конструкторы и инженеры сами проектируют подобные установки и разрабатывают надежные источники высоковольтного напряжения, а также комплектуют лабораторно-исследовательские комплексы из отдельных, имеющихся на рынке электротехнического оборудования, компонентов [14, 15].

Цель исследований – обоснование для практического применения и проведения исследований варианта реализации электротехнологической установки и проектирование её электрической части.

Результаты

Важнейшими воздействующими факторами на растительные объекты, материал и сырьё при их предварительной электроимпульсной обработке являются: 1) амплитуда прикладываемого к объекту обработки напряжения; 2) энергия одного воздействующего импульса и их количество; 3) длительность импульса напряжения и крутизна его фронта. Из проведенных исследований известно, чем больше амплитуда воздействующего импульса напряжения, приложенного к обрабатываемому растительному сырью, и чем круче его фронт и меньше длительность, тем обработка будет более технологически эффективной и менее энергетически и финансово затратной. Одним из главных составляемых технической реализации такого процесса является стабильность и надежность работы выходного каскада

электротехнологической установки, чего можно добиться, используя современную элементную базу для ее изготовления и микропроцессорное управление ключевыми элементами электрической части установки. Сама установка должна включать в себя источник высокого напряжения, блок формирования импульсов высокого напряжения, блок управления частотой следования импульсов, рабочую ячейку (камеру), систему электродов и контрольно-измерительные приборы [16, 17].

В основу разработки источника высоковольтных импульсов – генератора высоковольтных импульсов может быть положен один из вариантов его технической реализации с возможностью накопления электрической энергии в рабочем органе генератора, например, в емкостном компоненте (конденсатор) или в индуктивном (катушка индуктивности).

Применение катушки индуктивности в такого рода установках обязательно определяет наличие в ее электрической схеме: «зарядного устройства»; индуктивного накопителя и коммутирующего элемента – «электрического ключа», подключающего или отключающего нагрузку от схемы. Последний должен характеризоваться большой пропускной способностью по току, который протекает через него при накоплении электрической энергии или во время подвода ее к обрабатываемому объекту. Зарядка индуктивного накопителя требует наличия в составе генератора импульсов источника питания с большим значением выходного тока.

При использовании емкостного накопителя электрической энергии структура будет состоять из замыкающего ключа и зарядного устройства. Такого рода схема более проста в техническом исполнении и настройке, не требует применения источника питания с большим выходным током.

Сравнив достоинства и недостатки обоих технических решений, была выбрана схема генератора высоковольтных импульсов с емкостным накопителем энергии, для реализации которой необходимо обосновать конструкцию замыкающего ключа, выбрав один из двух вариантов – полупроводниковый или газоразрядный.

Приборы на основе полупроводниковых компонентов, применяемые в качестве «электрических ключей», имеют ограниченный спектр применения, так как характеризуются сравнительно низкой подвижностью носителей электрических зарядов в них и низкими значениями рабочих температур.

В импульсных мощных генераторах более широкое применение получили «электрические ключи» на основе газоразрядных приборов, которые характеризуются простотой эксплуатации, способностью коммутировать большие токи и заряды, возможностью высокоточного управления ими, а сам процесс замыкания в них связан с электрическим пробоем первоначально изолированного элемента. К такого рода ключам относят: искровые (газовые) разрядники, тригatronы, тирatronы и т.п.

Анализ характеристик перечисленных конструкций «электрических ключей», надежности работы и функционирования показал, что наиболее подходящим по критериям коммутируемого напряжения, допустимому току в импульсе, времени срабатывания, доступности и цене является тирatron.

Проектируемая установка содержит основные блоки: 1) повышающий высоковольтный трансформатор, обеспечивающий необходимый уровень напряжения, 2) высоковольтный диод с соответствующими параметрами допустимого выпрямляемого напряжения, 3) высоковольтный конденсатор, 4) токоограничивающий резистор, 5) камеру или ячейку обработки, 6) электродную систему, 7) ключевой элемент, 8) блок управления ключом.

Для удобства работы с установкой и повышения безопасности было принято решение конструктивно сделать ее состоящей из двух основных частей (блока управления и блока коммутации) (рис. 1). Блок управления включает в себя модуль питания, а также сопряженные между собой органы управления воздействующими импульсами и их формирования. Второй блок включает в себя «ключевой элемент», организующий коммутацию нагрузки. Высоковольтный трансформатор, выпрямитель, конденсатор и камера (ячейка) обработки не включены в общий корпус установки и подключаются к ней посредством специальных высоковольтных проводов.

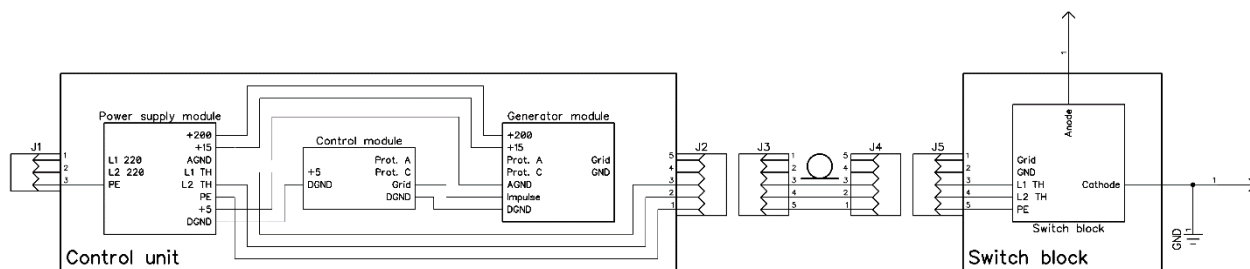


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – блок управления (control unit); 2 – модуль питания (power supply module); 3 – модуль управления (control module); 4 – модуль генератора (generator module); 5 – блок коммутатора (switch block)

В качестве ключевого элемента предложено использовать импульсный тирatron ТГИ 2-400/16 с

водородным наполнением, рассчитанным на напряжение 16 кВ и ток 400 А в импульсе. Для перевода

тиратрона из закрытого состояния в открытое необходимо подать прямоугольный импульс напряжения 200 В длительностью 4...5 мкс на сетку, относительно катода. Сетка тиратрона гальванически развязана через импульсный трансформатор МИТ-4В, характеристики которого соответствуют проектируемым требованиям: максимальное рабочее напряжение 250 В и длительность импульсов не более 5 мкс, коэффициент трансформации 1:1. Для получения значения напряжения 200 В постоянного тока предложено использовать понижающий трансформатор с подключённым к нему диодным мостом и сглаживающим конденсатором. Управляющий импульс необходимой длительности получается за счет использования быстродействующего полевого транзистора, затвором которого управляет драйвер, реализованный на специализированной микросхеме, обеспечивающей максимально крутой передний и задний фронт управляющего импульса и гальваническую развязку цепи управления. Для достижения стабильной работы установки и возможности настройки параметров обработки было принято решение реализовать управление на микроконтроллере ATmega328. Так как установка высоковольтная и в момент разряда емкостного накопителя создаются мощные импульсы, которые могут повлиять на работу микроконтроллера, все цепи управления, включая цепь питания, гальванически развязаны от модуля генерации импульсов и корпуса, что повышает стабильность работы микроконтроллера.

Для контроля, изменения и отображения параметров обработки, блок управления снабжен четырьмя кнопками управления, индикаторным трехцветным светоизлучающим диодом, характеризующим режим установки, и символьным двухстрочным LCD дисплеем с шестнадцатью символами в строке. В меню настройки можно задавать: емкость конденсатора, сопротивление нагрузки, частоту следования импульсов, а также активировать счетчик импульсов с режимом его отключения.

Такие электрические компоненты, как емкость конденсатора и сопротивление нагрузки необходимы для определения контроллером максимальной частоты следования импульсов и промежутков времени, через которые микроконтроллер будет посылать управляющие сигналы на сетку тиратрона. Разряд емкостного накопителя происходит не мгновенно, а по экспоненциальному закону и рассматривается обычно в зависимости от постоянной времени RC-цепи. Поэтому для того, чтобы микроконтроллеру определить подаваемую частоту следования импульсов, необходимо ввести значения емкости конденсаторного накопителя и примерную величину сопротивления нагрузки, обрабатываемого материала в камере обработки.

Для того, чтобы определить частоту следования управляющих импульсов на сетку, с учетом того факта, что частота обработки должна соответствовать частоте, заданной в меню микроконтроллера, используют следующую логику: длительность высоковольтного импульса определяется как сумма длительности управляющего импульса, времени запаздывания, постоянных времени разряда и заряда конденсатора:

$$t_{\text{имп}} = t_{\text{y.и.}} + t_3 + \tau_p + \tau_3, \quad (1)$$

где $t_{y.u.}$ – время управляющего импульса, $t_{y.u.}=5$ мкс; t_3 – время запаздывания тока анода по отношению к напряжению сетки, $t_3=0,6$ мкс; $\tau_p=3 \cdot C \cdot R_n$ – постоянная времени разряда конденсатора, с; $\tau_3=3 \cdot C \cdot R_{огр}$ – постоянная времени разряда конденсатора, с; C – емкость накопительного конденсатора, Ф; R_n – сопротивление нагрузки, Ом; $R_{огр}$ – сопротивление ограничения заряда, Ом.

Электрическая схема блока управления состоит из трех модулей: блока питания (рис. 2), управления (рис. 3) и генератора (рис. 4а).

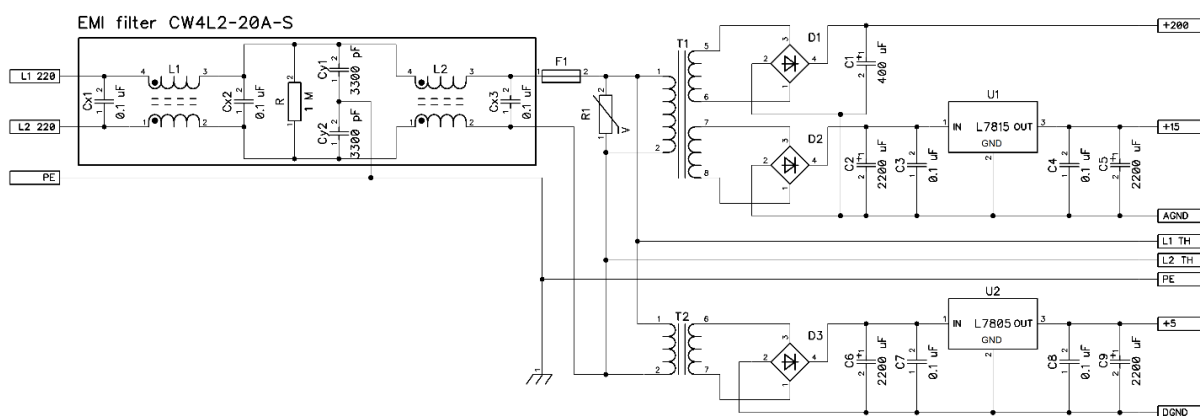


Рис. 2. Схема модуля питания

Сетевое напряжение 220 В промышленной частоты 50 Гц подается на фильтр электромагнитных помех, после чего поступает на понижающие трансформаторы Т1 и Т2, снижаясь до уровня в 150 В, 15 В

и 5 В соответственно (рис. 2). Затем переменное напряжение выпрямляется посредством полупроводниковых диодных мостов: D1, D2 и D3, сглаживаясь на выходе при помощи конденсаторов: C1, C2, C3,

С6, С7. Линейные стабилизаторы U1 и U2 обеспечивают стабилизированное напряжение 15 В для питания модуля генератора и 5 В для питания модуля управления. Предохранитель F1 защищает схему от перегрузок и короткого замыкания.

Модуль управления (рис. 3) объединяет органы управления S1...S4 и органы индикации D9...D11, LCD1 и микроконтроллер U3. Светоизлучающий диод, формируя оттенки цветовой гаммы, сигнализирует о состоянии установки: 1) синий оттенок светодиода –

информирует о нагреве катода тиратрона, и в соответствии с паспортом завода-изготовителя начать генерацию импульсов в течении 15 минут невозможно; 2) зеленый оттенок светодиода – генератор импульсного напряжения готов к работе, тиратрон нагрелся и имеется возможность включить генератора; 3) красный оттенок светодиода – генератор работает, на тиратрон поступают управляющие (поджигающие) импульсы.

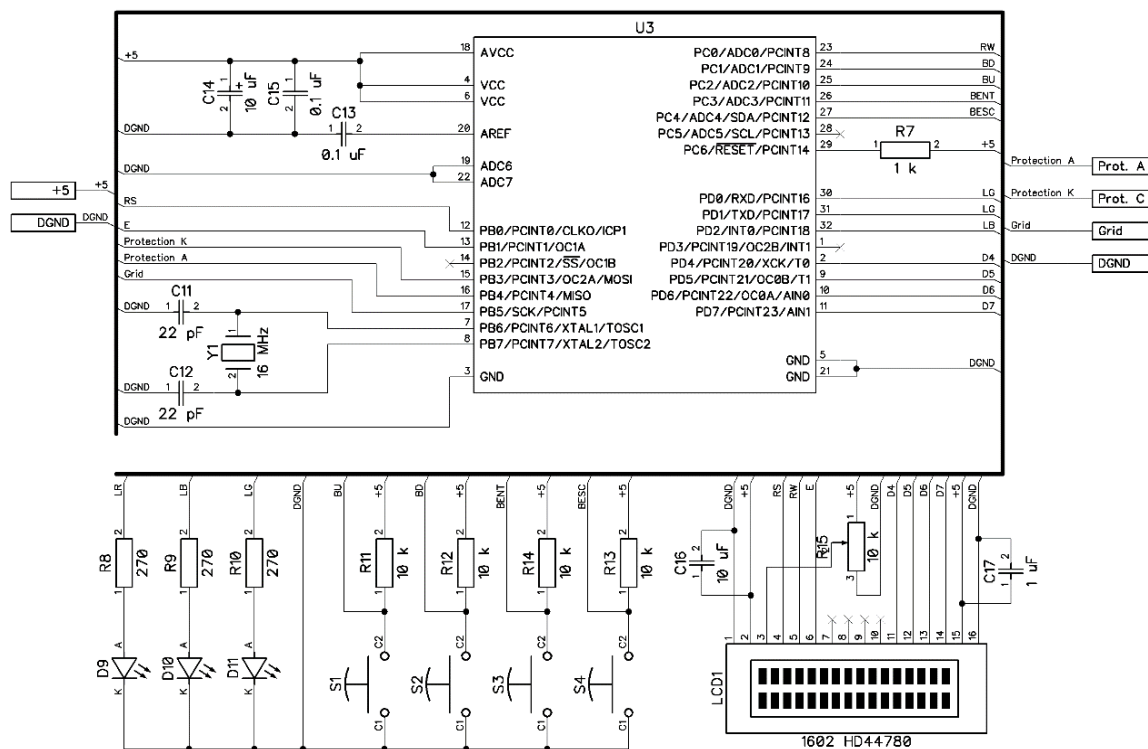


Рис. 3. Схема модуля управления

Кнопки управления используются для настройки параметров режимов обработки, а LCD дисплей отображает изменение этих параметров и информирует о счетчике импульсов в режиме генерации. Этот модуль также реализует защиту лампы от начала генерации без прогрева и отключение управляющего напряжения с сетки в случае «зависания» микроконтроллера или иной его нештатной работы.

Генератор импульсов (рис. 4 а) формирует импульсы амплитудой около 200 В для сетки тиратрона. При корректной работе микроконтроллера на оптопару (оптрон) VO1 подается корректный сигнал, она открывает транзистор Q2, который включает реле, обеспечивающее подключение импульсного трансформатора к напряжению 200 В. Диодная цепочка D4...D7 обеспечивает необходимые 12 В для работы реле. Импульсы нужной длительности и частоты для управления тиратроном от микроконтроллера поступают на гальванически изолированный драйвер VO2, управляющий транзистором Q1. Повышенные по уровню напряжения импульсы управления, снимаемые со вторичной обмотки разделительного

трансформатора Т3, через соединительный кабель передаются во второй структурный блок – блок коммутатора (рис. 4 б).

В блоке коммутатора сетевое напряжение питания 220 В поступает на понизительный трансформатор Т4, где снижается до уровня в 6,3 В и затем передается на накал тиратрона. Чтобы предотвратить ложное срабатывание при отсутствии управляющих импульсов, сетка тиратрона гальванически соединена с землей посредством резистора R16. Основная функция конденсатора С18 заключается в том, что на сетку лампы – тиратрона не следует подавать постоянное напряжение, которое может привести к его закрытию. В то же время при подаче управляющих импульсов от блока управления последние проходят через конденсатор С18 и попадают на сетку, открывая тиратрон, который сможет закрыться только при напряжении анода значением в 300 В. Особенностью данной схемы является тот факт, что все соединения в ней максимально короткие и выполнены проводами с заземленными экранами.

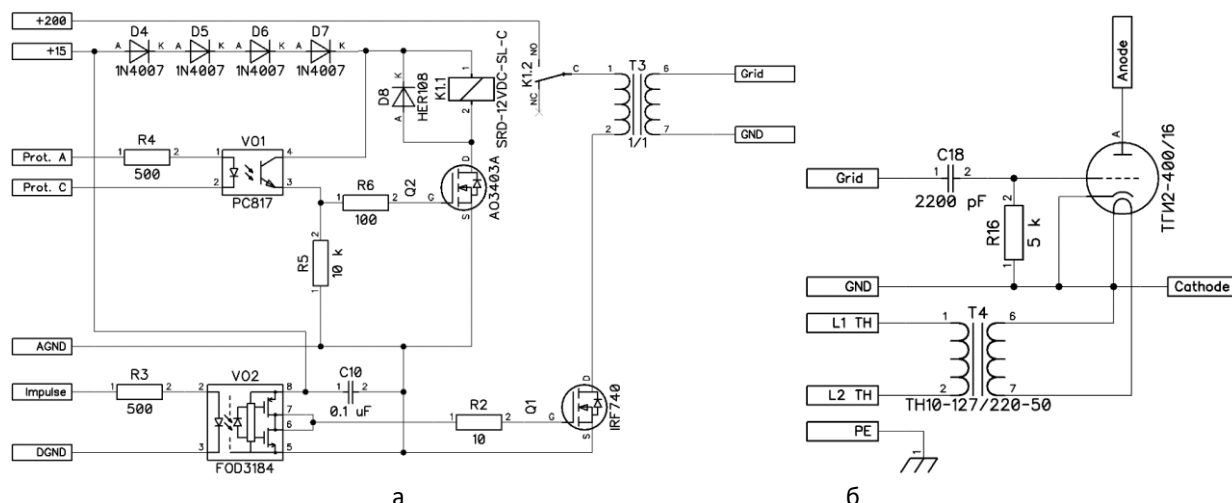


Рис. 4. Схема модуля генератора (а) и блока коммутатора (б)

Корпуса обоих блоков выполнены из металла (рис. 5 а). На передней панели блока управления смонтированы: 1) выключатель питания; 2) символьный индикатор для отображения параметров обработки, защищенный экраном из сверхпрочного поликарбоната; 3) кнопки для регулирования параметров обработки и перемещения по меню; 4) трехцветный индикаторный светодиод готовности установки к работе. На задней поверхности блока располагается сетевой разъем, клемма заземления, разъем для

соединения с блоком коммутатора и установлен кулер-вентилятор для охлаждения электронных компонентов. Соединительный кабель между двумя блоками изготовлен из экранированного провода типа МГТФ. На корпусе блока коммутатора размещена специально разработанная площадка для крепления тиратрона, изготовленная из стеклотекстолита с массивными латунными контактами, а на лицевой панели корпуса – разъем для соединения с блоком управления и клемма заземления.

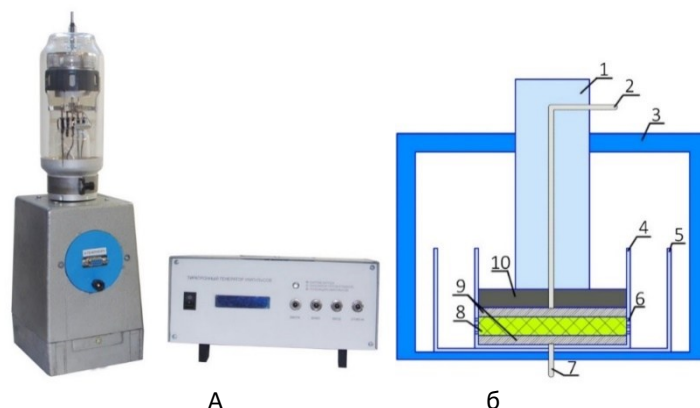


Рис. 5. Внешний вид блока коммутатора (а) и чертеж камеры обработки (б): 1 – полипропиленовая труба, 2 – вывод верхнего электрода, 3 – направляющие трубы, 4 – полипропиленовый цилиндр с отверстиями для выхода сока, 5 – стакан для сбора сока, 6 – отверстие для выхода сока, 7 – вывод нижнего электрода, 8 – объект обработки, 9 – электроды, 10 – прокладка с герметизирующим кольцом

Рабочая камера или ячейка (см. рис. 5 б) конструктивно, для варианта электроконтактной обработки растительного сырья или материала, выполнена следующим образом. Нижний электрод жестко закреплен на дне цилиндрического стакана для сбора сока, изготовленного из полипропилена. Верхний электрод выполнен подвижным и жестко прикреплен к прокладке, которая оснащена уплотнительным кольцом, предотвращающим выдавливание жидкой фракции из обрабатываемого образца при прессовании. Прокладка изготовлена из полипропилена и соединяется с полипропиленовой трубкой, внутри которой смонтирован провод от

электрода, а сама трубка выполняет роль штока поршня, которым при прессовании является верхний электрод. Электроды располагаются в полипропиленовом цилиндре с отверстиями для выхода выдавливаемого сока. Электроды выполнены из нержавеющей стали толщиной 2,5 мм и диаметром 40 мм.

При протекании постоянного тока и тока промышленной частоты через плодово-ягодные соки или пюре наблюдается их нагрев, причём на электродах выделяются продукты электролиза. Уменьшить влияние электролиза можно за счёт роста частоты подаваемого на ячейку переменного напряжения или укороченной длительности импульса, например, в

случае монополярного импульса. Поэтому рекомендуется применить достаточно короткие, с крутым фронтом и максимально возможной амплитудой высоковольтные импульсы. Большое значение падения напряжения на ячейке означает одновременно и увеличение падения напряжения на любом микрообъекте в получаемой жидкой суспензии, включая мембраны вегетативных клеток микроорганизмов.

Рабочую камеру или ячейку электротехнологической установки для исследования процесса электроимпульсной обработки материала растительного происхождения целесообразно изготавливать в виде плоского конденсатора, у которого токопроводящие обкладки (электроды) контактируют с самим обрабатываемым сырьем и которые целесообразно изготавливать из нержавеющей стали, чтобы не подвергать их коррозии. Расстояние между электродами следует выбирать исходя из необходимой для эффективного протекания процесса напряженности электрического поля в растительной ткани. Высоковольтные соединительные провода должны быть минимальной длины, не приводящей к пробоем, и максимально возможного сечения, это необходимо для уменьшения паразитной индуктивности, что положительно скажется на стабильности работы генератора. При использовании установки совместно с различным измерительным оборудованием для исключения возможного электромагнитного влияния рекомендуется подключать установку к сети через источник бесперебойного питания двойного преобразования, так при проведении исследований использовался ИБП Eaton серии 9130. Максимальный эффект без нагрева сырья был достигнут при напряженности электрического поля 20 кВ/см и поглощенной растительной тканью электрической энергии 6,2 кДж. Для достижения минимальной длительности импульса в установках с емкостным накопителем целесообразно использовать конденсатор выходного блока меньшей емкости, в этом случае форма импульса имеет крутой передний фронт и экспоненциальный спад.

Обсуждение

Спроектированная установка позволяет в лабораторных условиях изучать влияние электроимпульсных высоковольтных воздействий на объекты растительного происхождения с целью получения, например, сока или сокодержавных продуктов, и выявить оптимальные режимы проектируемой электротехнологии. Для разработанной конструкции присущи следующие достоинства: простота схемных электротехнических решений отдельных ее блоков; надежность их функционирования и стабильность поддержания выходных параметров, с требуемой для экспериментов точностью; возможность обработки сырья и материалов с варьируемыми параметрами и режимами; высокий уровень электробезопасности при работе.

Вопросы изучения электроконтактной обработки, например, электроимпульсного плазмоллиза, при подготовке растениеводческой продукции к переработке не являются новыми с точки зрения

получения научных знаний, но при этом все же существует проблема в техническом сопровождении проводимых исследований. За рубежом при проведении экспериментов зачастую используют промышленно изготавливаемое электротехническое оборудование и приборы, из которых собирают исследовательские комплексы. Кроме этого в распоряжении исследователей имеются и уже готовые варианты элементов технологических линий по переработке фруктов, овощей, масличных культур и др. [18, 19]. Основными компонентами таких комплексов являются высоковольтные источники питания, оборудованные приборами контроля сетевого напряжения и напряжения на их выходе. Генерация высоковольтных импульсов достигается путём зарядки батареи высоковольтных конденсаторов и разряда накопленной в них энергии через высоковольтный коммутатор в рабочую камеру или ячейку для обработки. При этом применяют три варианта основных конструкций такого рода рабочих пространств для обработки: с параллельными пластинчатыми электродами; с коаксиальной или коллинеарной конфигурацией цилиндрических электродов [20, 21, 22].

Отечественные исследователи зачастую не имеют возможности закупить уже готовые варианты компонентов исследовательских комплексов или специализированных промышленно выпускаемых аппаратов, поэтому разработанный и представленный в статье вариант электроимпульсной установки, на наш взгляд, позволяет устранить такую недостаточность в электротехнологическом оборудовании для научных и исследовательских лабораторий, изучающих перспективные способы подготовки сырья для последующей переработки или обработки растительных объектов.

Заключение

Исследования по электроимпульсной обработке растительных объектов невозможно осуществить, не имея соответствующего экспериментального оборудования, поэтому была поставлена задача по изготовлению, наладке и проведению первичных экспериментов на пилотной для этого установке. Была успешно спроектирована, обоснована и смонтирована электрическая часть экспериментальной установки с микроконтроллерным управлением за параметрами обработки и тиратроном в качестве коммутатора, а также изготовлена оригинальная конструкция рабочей камеры, предназначенной для непосредственного подведения электрической энергии к растительному сырью при помощи электродной системы. Для реализации такого рода установки были разработаны и изготовлены печатные платы для отдельных блоков и осуществлен монтаж на них электронных и электротехнических компонентов; изготовлены корпуса блока управления и коммутатора, а также площадка крепления тиратрона; написана программа для микроконтроллера; изготовлены рабочие ячейки с различными системами электродов. При проверке работоспособности и проведении

исследований установка показала стабильную работу без сбоев в различных режимах и при изменении параметров обработки, что указывает на надёжность ее эксплуатации и хорошо продуманную конструкцию. Проведенные опытные исследования показали высокую технологическую эффективность её применения. Так, при изучении электроимпульсного плазмолиза, выход сока и мякоти из яблочного сырья при фиксированном давлении на образец удалось увеличить с 0,22 г. до 6,24 г. из образца массой 7,03 г. Представленный подход для технической реализации установки может иметь практическую ценность при обосновании режимов электроконтактной обработки растительного сырья и техническом сопровождении процесса, а также при разработке новых схем управления и конструировании установок с интеграцией их, с учетом масштабирования, в производственные линии переработки плодоовощной продукции. Но в то же время, по нашему мнению, необходимо доработать электрическую часть схемы установки для получения прямоугольных воздействующих импульсов – с резким начальным подъемом (фронтом) и конечным спадом (срезом), что позволит более глубоко необратимо повреждать внутриклеточные компоненты растительных объектов, улучшая тем самым технологическую эффективность.

Литература

1. Гостев А. В. Развитие цифровизации земледелия на примере разработки современных агротехнологий с использованием цифровых систем // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 1. С. 4-9. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_4.
2. Беляева А. С., Никитина А. А. О проблемах и перспективах цифровой трансформации отечественного АПК // *Достижения науки и техники АПК*. 2023. Т. 37. № 1. С. 34-40. doi: 10.53859/02352451_2023_37_1_34
3. Кокурин Р. Г., Юдаев И. В., Даус Ю. В. Изучение процесса электроимпульсного плазмолиза яблочного и тыквенного сырья // *Вестник аграрной науки Дона*. 2023. Т. 16. № 3(63). С. 71-84. doi: 10.55618/20756704_2023_16_3_71-84
4. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development / V. I. Baev, V. A. Petrukhin, I. V. Baev, et al. // *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development* / V. Kharchenko, P. Vasant (Eds.). Hershey PA, 2018. Ch. 7. P. 149-176. doi: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007
5. Yudaev I. V., Daus Yu. V., Sharov I. V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025. Vol. 61. No. 6. P. 921–931. doi: 10.3103/S1068375525701005
6. The Impact of Pulsed Electric Field Treatment and Shelf Temperature on Quality of Freeze-Dried Pumpkin / O. Rastorhiev, A. Matys, A. Wiktor, et al. // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(11). Article 4561. doi: 10.3390/app14114561
7. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying / K. Yamakage, T. Yamada, T. Orikasa, et al. // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021. Vol. 68. Article 102615. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102615
8. Toepfl S., Knorr D. Pulsed electric fields as a pre-treatment technique in drying processes // *Stewart Post-harvest Review*. 2006. Vol. 2(4). P. 1-6. doi: 10.2212/spr.2006.4.3
9. Donsì F., Ferrari G., Pataro G. Applications of pulsed electric field treatments for the enhancement of mass transfer from vegetable tissue // *Food Engineering Reviews*. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 109-130. doi: 10.1007/s12393-010-9015-3
10. Pulsed Electric Field as a Mild Treatment for Extended Shelf-Life and Preservation of Bioactive Compounds in Blood Orange Juice / S. Fabroni, G. M. Platania, M. Amenta, et al. // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14. No. 16. Article 7275. doi: 10.3390/app14167275
11. Applications of Innovative Non-Thermal Pulsed Electric Field Technology in Developing Safer and Healthier Fruit Juices / U. Roobab, A. Abida, Ja. S. Chacha, et al. // *Molecules*. 2022. Vol. 27. No. 13. Article № 4031. doi: 10.3390/molecules27134031
12. Pulsed Electric Field Applications for the Extraction of Bioactive Compounds from Food Waste and By-Products: A Critical Review / T. Chatzimitakos, V. Athanasiadis, D. Kalompatsios, et al. // *Biomass*. 2023. Vol. 3. No. 4. P. 367-401. doi: 10.3390/biomass3040022
13. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants / Ch. Bitwell, S. S. Indra, Ch. Luke, et al. // *Scientific African*. 2023. Vol. 19. Article e01585. doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01585
14. Крастелев Е.Г., Седин А. А., Школьников Э. Я. Генератор импульсного напряжения и рабочая камера для электропорации водных взвесей растительного сырья // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2014. Т. 5. № 5. С. 429. doi: 10.1134/S2079562914050054
15. Юдаев И. В., Кокурин Р. Г., Даус Ю. В. Изучение процесса электроимпульсного плазмолиза растительного сырья // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2018. № 2(50). С. 346-354.
16. Исследовательский комплекс для изучения влияния высоковольтных электроимпульсных воздействий на личинки саранчовых насекомых / Р. Г. Кокурин, В. А. Эвиев, Б. И. Беляева и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2021. № 2(62). С. 454-467. doi: 10.32786/2071-9485-2021-02-45
17. Коротков С. В., Жмодиков А. Л., Коротков Д. А. Транзисторные генераторы мощных прямоугольных импульсов с субмикросекундной длительностью //

Приборы и техника эксперимента. 2024. № 1. С. 71-76. doi: 10.31857/S0032816224010109

18. Brito I. P. C., Silva E. K. Pulsed electric field technology in vegetable and fruit juice processing: A review // Food Research International. 2024. Vol. 184. Article 114207. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114207

19. The application of PEF technology in food processing and human nutrition / K. Nowosad, M. Sujka, U. Pankiewicz, et al. // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58(2). P. 397-411. doi:10.1007/s13197-020-04512-4

20. Ghoshal G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: gaps in current studies for potential future research // Heliyon. 2023. Vol. 9 (6). P. e17532. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17532

21. Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China / D. Niu, X.-A. Zeng, E.-F. Ren, et al. // Food Research International. 2020. Vol. 137. P. 109715. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109715.

22. Pulsed Electric Field: Fundamentals and Effects on the Structural and Techno-Functional Properties of Dairy and Plant Proteins / A. Taha, F. Casanova, P. Šimonis, et al. // Foods. 2023. Vol. 11. P. 1556. doi: 10.3390/foods11111556

References

1. Gostev A. V. Development of digitalization of agriculture on the example of the development of modern agricultural technologies using digital systems // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025. Vol. 39. No. 1. P. 4-9. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_4

2. Belyaeva A. S., Nikitina A. A. On the problems and prospects of digital transformation of the domestic agro-industrial complex // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023. Vol. 37. No. 1. P. 34-40. doi: 10.53859/02352451_2023_37_1_34

3. Kokurin R. G., Yudaev I. V., Daus Yu. V. Study of the process of electric pulse plasmolysis of apple and pumpkin raw materials // Vestnik of agrarian science of the Don. 2023. Vol. 16. No. 3(63). P. 71-84. doi: 10.55618/20756704_2023_16_3_71-84

4. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development / V. I. Baev, V. A. Petrukhin, I. V. Baev, et al. // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development / V. Kharchenko, P. Vasant (Eds.). Hershey PA, 2018. Ch. 7. P. 149-176. doi: 10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007.

5. Yudaev I. V., Daus Yu. V., Sharov I. V. Electropulse Weed Control as an Element of Organic Farming in Sustainable Agriculture // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2025. Vol. 61. No. 6. P. 921-931. doi: 10.3103/S1068375525701005

6. The Impact of Pulsed Electric Field Treatment and Shelf Temperature on Quality of Freeze-Dried Pumpkin / O. Rastorhuiev, A. Matys, A. Wiktor, et al. // Applied Sciences. 2024. Vol. 14(11). Article 4561. doi: 10.3390/app14114561

7. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying / K. Yamakage, T. Yamada, T. Orikasa, et al. // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. Vol. 68. Article 102615. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102615

8. Toepfl S., Knorr D. Pulsed electric fields as a pre-treatment technique in drying processes // Stewart Post-harvest Review. 2006. Vol. 2(4). P. 1-6. doi: 10.2212/spr.2006.4.3

9. Donsì F., Ferrari G., Pataro G. Applications of pulsed electric field treatments for the enhancement of mass transfer from vegetable tissue // Food Engineering Reviews. 2010. Vol. 2.No. 2. P. 109-130. doi: 10.1007/s12393-010-9015-3

10. Pulsed Electric Field as a Mild Treatment for Extended Shelf-Life and Preservation of Bioactive Compounds in Blood Orange Juice / S. Fabroni, G. M. Platania, M. Amenta, et al. // Applied Sciences (Switzerland). 2024. Vol. 14.No. 16. Article 7275. doi: 10.3390/app14167275

11. Applications of Innovative Non-Thermal Pulsed Electric Field Technology in Developing Safer and Healthier Fruit Juices / U. Roobab, A. Abida, Ja. S. Chacha, et al. // Molecules. 2022. Vol. 27. No. 13. Article No. 4031. doi: 10.3390/molecules27134031

12. Pulsed Electric Field Applications for the Extraction of Bioactive Compounds from Food Waste and By-Products: A Critical Review / T. Chatzimitakos, V. Athanasiadis, D. Kalompatsios, et al. // Biomass. 2023. Vol. 3. No. 4. P. 367-401. doi: 10.3390/biomass3040022

13. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants / Ch. Bitwell, S. S. Indra, Ch. Luke, et al. // Scientific African. 2023. Vol. 19. Article e01585. doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01585

14. Krastelev E.G., Sedin A.A., Shkolnikov E.Ya. Pulse voltage generator and working chamber for electroporation of aqueous suspensions of plant raw materials // Nuclear Physics and Engineering. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 429. doi: 10.1134/S2079562914050054

15. Yudaev I. V., Kokurin R. G., Daus Yu. V. Study of the process of electropulse plasmolysis of plant raw materials // News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2018. No. 2(50). P. 346-354.

16. Research complex for studying the effect of high-voltage electropulse effects on locust insect larvae / R. G. Kokurin, V. A. Eviev, B. I. Belyaeva, et al. // News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2021. No. 2(62). P. 454-467. doi: 10.32786/2071-9485-2021-02-45

17. Korotkov S. V., Zhmodikov A. L., Korotkov D. A. Transistor generators of powerful rectangular pulses with submicrosecond duration // Instruments and experimental equipment. 2024. No. 1. P. 71-76. doi: 10.31857/S0032816224010109

18. Brito I. P. C., Silva E. K. Pulsed electric field technology in vegetable and fruit juice processing: A review / I. P. C. Brito, E. K. Silva // Food Research International.

2024. Vol. 184. Article 114207. doi: 10.1016/j.food-res.2024.114207

19. The application of PEF technology in food processing and human nutrition / K. Nowosad, M. Sujka, U. Pankiewicz, et al. // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58(2):397-411. doi:10.1007/s13197-020-04512-4

20. Ghoshal G. Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: gaps in current studies for potential future research // Heliyon. 2023. Vol. 9 (6). P. e17532. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17532

21. Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China / D. Niu, X.-A. Zeng, E.-F. Ren, et al. // Food Research International. 2020. Vol. 137. Article 109715. doi: 10.1016/j.food-res.2020.109715

22. Pulsed Electric Field: Fundamentals and Effects on the Structural and Techno-Functional Properties of Dairy and Plant Proteins / A. Taha, F. Casanova, P. Šimonis, et al. // Foods. 2023. Vol. 11. Article 1556. doi: 10.3390/foods11111556