

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ АГРАРНЫХ НАВУК. 2026. Т. 64, № 2

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ АГРАРНЫХ НАУК. 2026. Т. 64, № 2

Журнал основан в январе 1963 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 396 от 18.05.2009

Главный редактор

Петр Петрович Казакевич – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

В. В. Азаренко – Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

Е. Ф. Борисова (ведущий редактор)

С. А. Касьянчик – Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Д. И. Комлач – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь

С. А. Кондратенко – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

С. В. Кравцов – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию,
Жодино, Беларусь

А. П. Лихацевич – Институт мелиорации, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

З. В. Ловкис – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
Минск, Беларусь

В. Л. Маханько – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству
и плодоовощеводству, Самохваловичи, Беларусь

А. В. Мелешеня – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
Минск, Беларусь

В. К. Пестис – Гродненский государственный аграрный университет, Гродно, Беларусь

- А. В. Пилипук** – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- А. И. Портной** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь
- П. В. Рассторгуев** – Институт системных исследований в АПК Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- В. Н. Тимошенко** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь
- Ю. К. Шашко** – Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционный совет:

- И. М. Богдевич** – Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь
- Ф. И. Василевич** – Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К. И. Скрябина, Москва, Россия
- Г. В. Гавардашвили** – Институт водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия
- В. И. Долженко** – Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия
- А. И. Иванов** – Почвенный институт имени В. В. Докучаева, Москва, Россия
- В. М. Косолапов** – Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса, Лобня, Россия
- П. А. Красочко** – Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского, Минск, Беларусь
- А. Б. Лисицын** – Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
- Я. П. Лобачевский** – Отделение сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Россия
- А. Б. Молдашев** – Казахский научно-исследовательский институт экономики агропромышленного комплекса и развития сельских территорий, Алматы, Казахстан
- Е. Н. Седов** – Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Жилина, Россия
- Н. И. Стрекозов** – Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, Дубровицы, Россия
- В. Г. Сычев** – Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова, Москва, Россия
- И. Г. Ушачев** – Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия
- И. П. Шейко** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Журнал рецензируется. Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: +375 17 374-02-45; e-mail: agro-vesti@mail.ru
vestiagr.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия аграрных наук. 2026. Т. 64, № 2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *Е. Ф. Борисова*
Компьютерная верстка *С. Н. Костюк*

Подписано в печать 15.04.2026. Выход в свет 28.04.2026. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 54 экз. Заказ 75.
Цена номера: индивидуальная подписка – 15,86 руб., ведомственная подписка – 35,17 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук, 2026

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

AGRARIAN SERIES. 2026, vol. 64, no. 2

The Journal was founded in 1963

Issued four times a year

Founded is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. no. 396

The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database of the Russian Scientific Citation Index (RSCI)

E d i t o r - i n - C h i e f

Petr P. Kazakevich – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l B o a r d :

Vladimir V. Azarenko – Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(*Deputy Editor-in-Chief*)

Elena F. Borisova (*Lead Editor*)

Svetlana A. Kasyanchyk – Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Dmitry I. Komlach – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Belarus

Svetlana A. Kondratenko – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Siarhei U. Krautsou – Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Arable Farming, Zhodino, Belarus

Anatol P. Likhatchevich – Institute for Land Reclamation, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Zenon V. Lovkis – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff, Minsk, Belarus

Vadim L. Makhanko – Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, Samokhvalovichi, Belarus

Aleksey V. Meleshchenya – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff, Minsk, Belarus

Vitold K. Pestis – Grodno State Agrarian University, Grodno, Belarus

Andrey V. Pilipuk – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aliaksandr I. Partny – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding, Zhodino, Belarus

Petr V. Rastorgouev – Institute of System Researches in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir N. Timoshenko – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus
for Animal Breeding, Zhodino, Belarus
Yury K. Shashko – Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Council:

Iosif M. Bogdevich – Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus
Fedor I. Vasilevich – Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA by K. I. Skryabin,
Moscow, Russia
Givi V. Gavardashvili – Institute of Water Management named after T. Mirtskhulava of the Georgian Technical University,
Tbilisi, Georgia
Victor I. Dolzhenko – All-Russian Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Pushkin, Russia
Andrey L. Ivanov – V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Federation, Moscow, Russia
Vladimir M. Kosolapov – Federal Williams Research Centre of Forage Production and Agroecology, Lobnya, Russia
Petr A. Krasochko – S. N. Vyshel'sky Institute of Experimental Veterinary Medicine, Minsk, Belarus
Andrey B. Lisitsyn – V. M. Gorbato'v Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia
Yakov P. Lobachevsky – Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Altynbek B. Moldashev – Kazakh Research Institute of Economy of Agro-Industrial Complex and Rural Development,
Almaty, Kazakhstan
Evgeny N. Sedov – All-Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina, Russia
Nikolay I. Strekozov – Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst,
Dubrovitsy, Russia
Victor G. Sychev – All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov,
Moscow, Russia
Ivan G. Ushachev – Federal Research Center of Agrarian Economy and Social Development of Rural Areas –
All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia
Ivan P. Sheyko – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding,
Zhodino, Belarus

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

*Address of the Editorial Office:
1, room 118, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: + 375 17 374-02-45; e-mail: agro-vesti@mail.ru.
vestiagr.belnauka.by*

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Agrarian series, 2026, vol. 64, no. 2

Printed in Russian, Belarusian and English

Editor *E. F. Borisova*
Computer imposition *S. N. Kostsyuk*

It is sent of the press 15.04.2026. Appearance 28.04.2026. Format 60×84^{1/8}. Offset paper. The press digital.

Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 54 copies. Order 75.

Number price: individual subscription – 15,86 byn., departmental subscription – 35,17 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2,
2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina St., 220084, Minsk,
Republic of Belarus

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series, 2026

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЗМЕСТ**ЭКАНОМІКА**

- Киреенко Н. В., Гусарова Т. В.** Обеспечение сбалансированного инновационного роста экономики организаций агропромышленного комплекса Республики Беларусь..... 95

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА

- Колбанова Е. В., Кухарчик Н. В., Божидай Т. Н.** Ризогенез *in vitro* и адаптация *ex vitro* сортов груши, районированных в Беларуси..... 111
- Лукин С. В., Говоркова С. Б.** Радионуклиды и тяжелые металлы в агроэкосистемах Центрального Черноземья России: мониторинг и оценка (Белгородская область)..... 128

ЖЫВЁЛАГАДОЎЛЯ І ВЕТЭРЫНАРНАЯ МЕДЫЦЫНА

- Кошак Ж. В., Дегтярик С. М., Денисов Д. Н.** Комбикорма функционального назначения для осетровых и лососевых рыб с использованием гуминовых веществ 141

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

- Азаренко В. В., Жешко А. А.** К вопросу обоснования конструктивных параметров накопительных емкостей высокоточных машин для внесения минеральных удобрений..... 153

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ

- Рожнов Е. Д., Школьникова М. Н., Мусина О. Н.** Кинетика и механизм деградации каротиноидов в тыквенном порошке: роль температуры и состава упаковочной атмосферы (*на английском языке*)..... 165

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

CONTENTS

ECONOMICS

- Kireyenka N. V., Husarava T. V.** Ensuring balanced innovative economic growth of organizations of the agro-industrial complex in the Republic of Belarus 95

AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

- Kolbanova E. V., Kukharchyk N. V., Bazhydai T. N.** *In vitro* rhizogenesis and *ex vitro* adaptation of pear cultivars regionalized in Belarus 111
- Lukin S. V., Govorkova S. B.** Radionuclides and heavy metals in agroecosystems of the Central Black Earth Region of Russia: monitoring and assessment (Belgorod region)..... 128

ANIMAL HUSBANDRY AND VETERINARY MEDICINE

- Koshak Zh. V., Degtyarik S. M., Denisov D. N.** Functional-purpose compound feed for sturgeon and salmon fish containing humic substances 141

MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

- Azarenko V. V., Zheshka A. A.** On the issue of substantiating the design parameters of storage tanks of high-precision machines for applying mineral fertilizers..... 153

PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS

- Rozhnov E. D., Shkolnikova M. N., Musina O. N.** Kinetics and mechanism of carotenoid degradation in pumpkin powder: effect of storage temperature and packaging atmosphere 165

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЭКАНОМІКА**ECONOMICS**

УДК 338.43:001.895(476)

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-95-110>

Поступила в редакцию 20.11.2025

Received 20.11.2025

Н. В. Киреенко¹, Т. В. Гусарова²¹*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь*²*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь***ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОГО ИННОВАЦИОННОГО РОСТА
ЭКОНОМИКИ ОРГАНИЗАЦИЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Аннотация. На современном этапе развития Республики Беларусь происходит трансформация национальной экономики в инновационную социально-экономическую систему, что приводит к изменению не только характера труда и основных производительных сил, но и качества жизни населения страны. В мировом масштабе данный этап характеризуется сменой технологического базиса и модели управления экономикой, усилением ее социальной ориентации, глобализацией и регионализацией торгово-экономических отношений между странами и их компаниями. Вместе с тем развитие инновационной модели агропромышленного комплекса (АПК) Республики Беларусь обуславливает необходимость укрепления конкурентных преимуществ организаций на основе выработки научно обоснованных предложений и рекомендаций, в том числе по обеспечению сбалансированного инновационного роста. Изучены научные концепции и факторы, определяющие сущность категории «сбалансированный инновационный рост», а также обоснованы методические подходы к разработке моделей и оценке эффективности инновационной инфраструктуры АПК. На примере субъектов хозяйствования Республики Беларусь, занимающихся производством мяса и переработкой мясной продукции, выполнена оценка уровня их сбалансированного развития. В дополнение разработана стратегия обеспечения инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь, включающая концептуальную модель внедрения новых технологий по основным бизнес-процессам, систему комплексного мониторинга инновационной активности организации, а также электронную площадку как специализированный онлайн-ресурс. Практическое внедрение полученных результатов будет способствовать расширению конкурентных преимуществ организаций АПК на внутреннем и внешнем рынках, достижению финансовой устойчивости и обеспечению продовольственной безопасности страны.

Ключевые слова: сбалансированность, инновационный рост, экономика, организация, агропромышленный комплекс, модель, методика, интегральный показатель, инновационная инфраструктура, конкурентные преимущества, факторы, эффективность

Для цитирования: Киреенко, Н. В. Обеспечение сбалансированного инновационного роста экономики организаций агропромышленного комплекса Республики Беларусь / Н. В. Киреенко, Т. В. Гусарова // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 95–110. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-95-110>

Natallia V. Kireyenko¹, Tatsiana V. Husarava²¹*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus*²*Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus***ENSURING BALANCED INNOVATIVE ECONOMIC GROWTH OF ORGANIZATIONS
OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

Abstract. At the current stage of development of the Republic of Belarus, the national economy is transforming into an innovative socio-economic system, which leads to changes not only in the nature of work and the main productive forces, but also in the quality of life of the country's population. On a global scale, this stage is characterized by a change in the technological basis and model of economic management, strengthening of its social orientation, globalization, and regionalization of trade

and economic relations between countries and their companies. At the same time, the development of an innovative model of the agro-industrial complex (AIC) of the Republic of Belarus necessitates strengthening the competitive advantages of organizations based on the development of scientifically based proposals and recommendations, including those on ensuring balanced innovative growth. The article examines the scientific concepts and factors determining the essence of the category “balanced innovative growth” and substantiates methodological approaches to the development of models and evaluation of the effectiveness of the innovative infrastructure of the AIC. Using the example of business entities in the Republic of Belarus engaged in meat production and processing of meat products, an assessment of their level of balanced development is made. In addition, a strategy for ensuring innovative economic growth for agricultural organizations in the Republic of Belarus has been developed. This strategy includes a conceptual model for implementing new technologies across core business processes, a system for comprehensively monitoring the organization’s innovative activity, and an electronic platform as a specialized online resource. The practical implementation of these results will contribute to the expansion of the competitive advantages of agricultural organizations in domestic and foreign markets, the achievement of financial sustainability, and the assurance of the country’s food security.

Keywords: balance, innovative growth, economics, organization, agro-industrial complex, model, methodology, integrated indicator, innovative infrastructure, competitive advantages, factors, efficiency

For citation: Kireyenka N. V., Husarava T. V. Ensuring balanced innovative economic growth of organizations of the agro-industrial complex in the Republic of Belarus. *Vestsii Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 95–110 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-95-110>

Введение. Агропромышленный комплекс (АПК) выполняет комплекс социально-экономических функций и характеризуется высоким уровнем конкуренции между производителями за потребителя, что требует постоянного поиска инноваций, обеспечивающих долгосрочные конкурентные преимущества и сбалансированное развитие организаций. Эффективное их функционирование обуславливается многообразием внутренних и внешних факторов, в том числе инновационным ростом экономики, устанавливающим функциональную зависимость между производством и научно-техническим прогрессом. Данные аспекты подтверждаются основными положениями нормативных правовых документов Республики Беларусь, среди которых: Декрет Президента Республики Беларусь № 8 от 21 декабря 2017 г. «О развитии цифровой экономики»¹, Директива Президента Республики Беларусь от 4 марта 2019 г. № 6 «О развитии села и повышении эффективности аграрной отрасли»², Указ Президента Республики Беларусь № 381 от 29 ноября 2023 г. «О цифровом развитии»³, Программа деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы⁴, Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года⁵, государственные программы Республики Беларусь по инновационному и цифровому развитию видов экономической деятельности, в том числе и аграрного бизнеса.

Выполненный нами обзор литературных источников показал, что в теории и практике выделяется несколько моделей экономического роста (экстенсивный, интенсивный), отражающие соответствующий этап развития, которые заложены в трудах Ф. Кенэ, К. Маркса, В. Леонтьева, Г. Фельдмана, Р. Харрода, Е. Домара [1–8]. Мировой опыт свидетельствует: чтобы перейти к новому качеству роста, требуются не отдельные меры, а комплексное использование сложной совокупности многообразных факторов, взаимосвязи которых с показателями экономического роста

¹ О развитии цифровой экономики: Декрет Президента Респ. Беларусь от 21 дек. 2017 г. № 8 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=Pd1700008> (дата обращения: 20.10.2025).

² О развитии села и повышении эффективности аграрной отрасли: Директива Президента Респ. Беларусь от 4 марта 2019 г. № 6 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P01900006> (дата обращения: 20.10.2025).

³ О цифровом развитии: Указ Президента Респ. Беларусь от 29 ноября 2023 г. № 381 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300381> (дата обращения: 21.10.2025).

⁴ Об утверждении Программы деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 8 мая 2025 г. № 254 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22500254> (дата обращения: 21.10.2025).

⁵ Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года // Министерство экономики Республики Беларусь: [сайт]. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/proekt-Natsionalnoj-strategii-ustojchivogo-razvitija-na-period-do-2040-goda.pdf> (дата обращения: 20.10.2025).

порождают инновационное развитие региона, страны, группы компаний, организации. Это обусловило углубленное изучение данного направления. Так, вопросам системной сбалансированности экономики, структурной устойчивости и сбалансированного роста посвящены труды А. Г. Аганбегяна, А. А. Быкова, А. М. Заборовского, Г. Б. Клейнера, А. И. Лученка, В. В. Пинигина, А. М. Филиппова [9–17]; равновесным моделям – Э. И. Позамантира, Ю. С. Попкова [18, 19]; сбалансированного развития организаций – А. С. Мищенко, С. В. Мордвинова, Г. В. Савицкой, Е. В. Семеновой, А. Д. Шеремета [20–24]. Необходимо отметить, что в настоящее время как отечественными, так и зарубежными учеными акцент сделан на сбалансированном росте экономики организаций АПК (В. И. Бельский, В. Г. Гусаков, Н. В. Киреенко, Л. В. Пакуш, И. А. Войтко, А. В. Грибов, В. Н. Комков) [25–32].

Вместе с тем, несмотря на высокую значимость проведенных ранее исследований, следует отметить, что в современных условиях хозяйствования для АПК важным является теоретическое обоснование такой категории, как «сбалансированный инновационный рост». В методическом плане требуется систематизация подходов и разработка методики оценки уровня сбалансированного инновационного развития организаций АПК; в практическом – разработка стратегии и выработка практических рекомендаций по конкурентоустойчивому функционированию субъектов. В данном контексте *цель исследования* состоит в разработке научно обоснованного инструментария и мероприятий по обеспечению сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь, направленных на расширение конкурентных преимуществ субъектов на внутреннем и внешнем рынках, а также достижение их финансовой устойчивости.

Теоретическое и методическое обоснование сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК. Развитие мировой и национальной экономики Республики Беларусь показало, что даже в условиях рынка должны быть обеспечены определенные пропорции, направленные на поддержание сбалансированности экономических и инновационных систем. Изучение научных трудов отечественных и зарубежных ученых и практиков свидетельствует, что, во-первых, категория «сбалансированность» рассматривается в контексте проблем развития социально-экономических систем [9–17, 33]; во-вторых, с точки зрения инноваций как формы проявления научно-технического прогресса [20–32, 34, 35].

При этом в экономической теории данная дефиниция тесно связана с экономическим ростом. Поддержание состояния согласованности и соответствия между взаимосвязанными элементами системы субъекта хозяйствования не позволяет говорить о расширенном развитии. В этой связи для нормального функционирования национальной экономики важно обеспечивать ее рост, поэтому в контексте эффективности используются понятия «сбалансированный рост» и «сбалансированное развитие». По мнению ряда исследователей [11–13, 16, 21, 23], сбалансированный рост выступает целевой функцией, достижение которой определяется как обеспечение баланса между запланированной и текущей ситуацией, а также соблюдение установленных пропорций. В современных реалиях именно эффективное использование новых инновационных и цифровых технологий является основой международной и внутренней конкурентоспособности как отдельных компаний, так и целых стран, формирующих соответствующую правовую среду и инфраструктуру.

В научный оборот понятие «инновация» как новая экономическая категория было введено австрийским ученым Йозефом Шумпетером [34]. Автор предложил новые комбинации факторов производства и трактовал исследуемую категорию как любое возможное изменение, происходящее вследствие коммерческого использования новых или усовершенствования существующих решений технического, технологического, организационного характера в процессах производства, снабжения, сбыта продукции. Поэтому, начиная с 1940–1960-х гг. XX в. в рамках неоклассических подходов к построению моделей роста, наряду с основными производственными факторами, важную роль стал играть научно-технический прогресс (НТП), что позволило выделить категорию «инновационный рост». Так, Г. А. Сызранцев рассматривает ее как процесс качественного изменения организации, ее эффективности за счет применения технических, техноло-

гических, экономических и организационных нововведений в производительных силах на основе НТП, не влекущего за собой больших финансовых вложений (за исключение реновации) [36]. В свою очередь, А. С. Сафронов инновационным определяет экономический рост, базирующийся на развитии предпринимательской инициативы в сфере рыночной, научно-технической и организационно-экономической деятельности [37]. При этом К. П. Федорова рассматривает понятие «инновационный экономический рост», под которым понимает увеличение объема ВВП за счет использования новейших технологических достижений, создания нового, более качественного продукта, имеющего высокую добавленную стоимость и более высокую конкурентоспособность [38]. В данном контексте нами для организаций АПК предлагается сбалансированный инновационный рост рассматривать как формирование положительной динамики показателей эффективности инновационной деятельности субъекта хозяйствования на протяжении среднесрочного периода времени (3–5 лет) на основе достижения поставленных целей и задач, обеспечивающих стабильное его функционирование в заданных условиях с целью укрепления конкурентных преимуществ.

В развитие новой интерпретации рассматриваемой категории нами разработана классификация факторов сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК, базирующаяся на классических основах экономической теории, положениях нормативного правового регулирования Республики Беларусь и условиях, влияющих на экономический рост страны в целом (рис. 1).

Научная новизна разработки состоит в выделении отраслевых и товарных факторов (биологические, ресурсно-технические, трудовые, инновационные, производственно-экономические), являющихся методической базой формирования сбалансированного производства и реализации продукции в соответствии с внутренними потребностями населения и производственными возможностями обрабатывающей (пищевой) промышленности, а также обеспечения финансовой устойчивости производителей.

Установлено, что инфраструктура является неотъемлемым компонентом любой социально-экономической системы, который играет важнейшую роль в обеспечении национальной продовольственной безопасности. Согласно теоретическим исследованиям различных авторов [28, 39–43] и на основе изучения зарубежного опыта нами выделены модели формирования инновационной инфраструктуры (производственная, сбытовая, социальная, рыночная). При этом ключевым аспектом каждой из них является состав, который определяется ее масштабами, географией, функциями, отраслевой специализацией и другими факторами, характеризующими территориально-демографическую, социально-экономическую и административно-политическую ценность (рис. 2).

Такой взгляд позволил обосновать основные подходы к экономической оценке эффективности функционирования инновационной инфраструктуры, базирующиеся на основе: а) выбора факторов производственной инфраструктуры, оценке их влияния на экономический рост и национальную продовольственную безопасность; б) разработки направлений развития сбытовой деятельности и проведения экономического анализа для оценки ее результативности; в) использования эконометрических моделей оценки уровня развития социальной инфраструктуры; г) определения интегрального показателя функционирования субъектов рыночной инфраструктуры.

Условия сбалансированного инновационного роста производства и реализации аграрной продукции в Республике Беларусь. Современные тренды инновационного развития отечественного аграрного бизнеса базируются на правовых, институциональных, экономических, финансовых и кадровых условиях. При этом за 2020–2024 гг. эффективность функционирования субъектов в значительной степени предопределяется повышением их инновационной активности, что способствовало росту валовой добавленной стоимости на 59,8 %, рентабельности продаж в сельском хозяйстве – на 0,8 п. п., экспорта сельскохозяйственной продукции и продуктов питания – на 47,3 % (табл. 1).

Главный фактор в достижении этих показателей – это повышение производительности труда на 80,5 % (2020 г. – 74 688 р/чел., 2022 г. – 105 674 р/чел., 2024 г. – 134 784 р/чел.). Данные результаты достигнуты прежде всего благодаря внедрению передовых ресурсосберегающих технологий

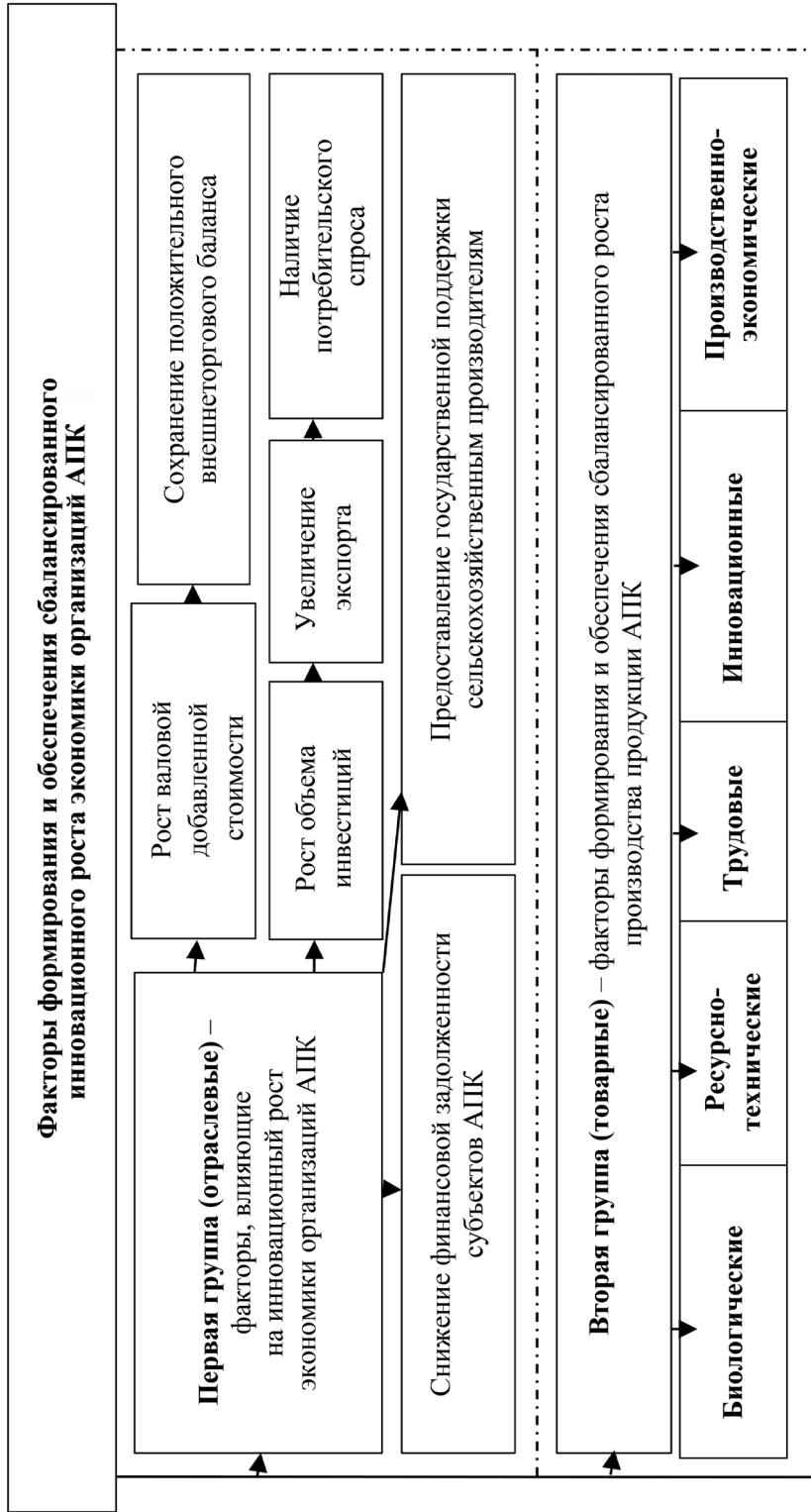


Рис. 1. Классификация факторов формирования и обеспечения сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК

Fig. 1. Classification of factors shaping and ensuring balanced innovative economic growth in organizations of the AIC

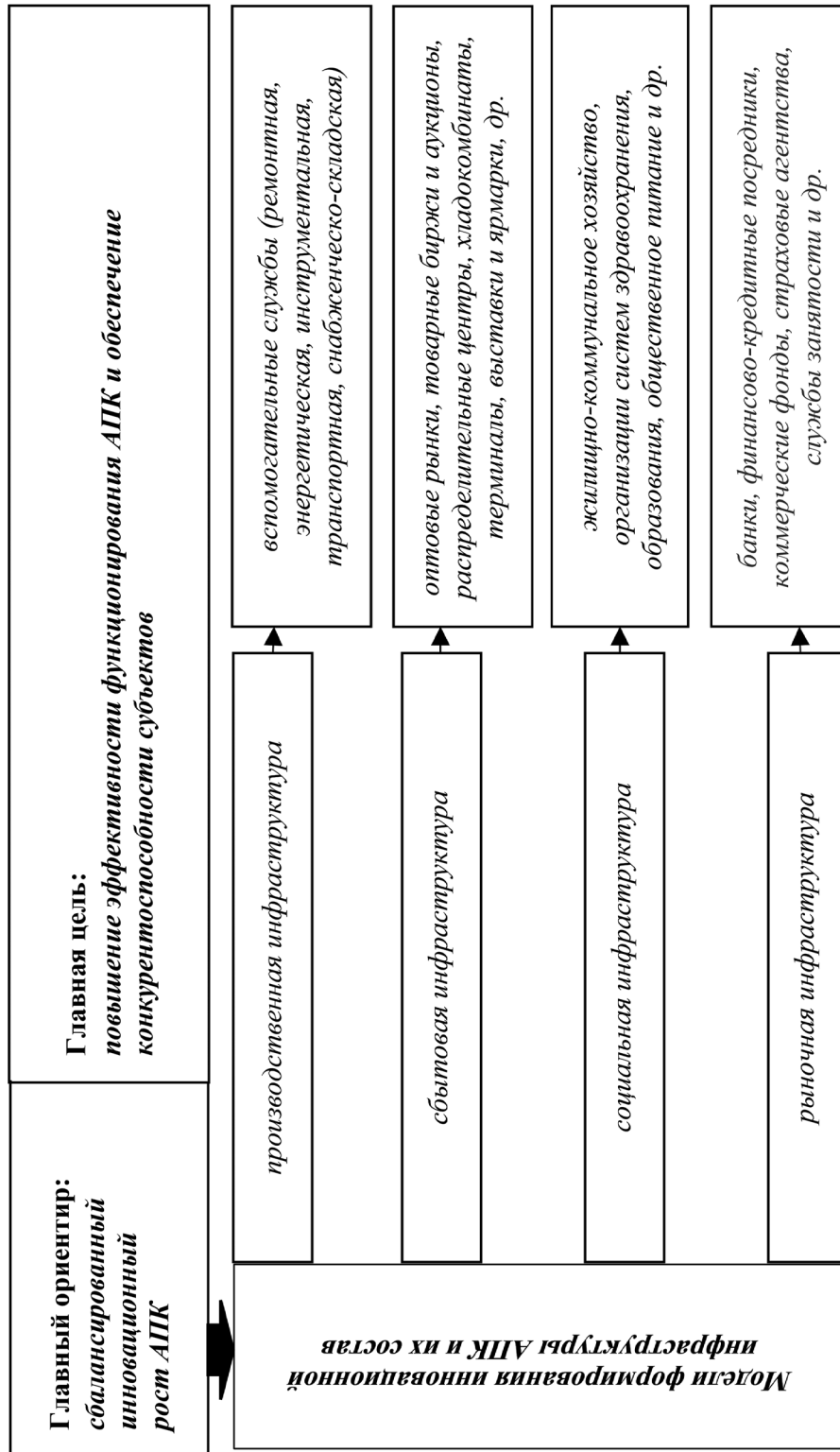


Рис. 2. Модели формирования инновационной инфраструктуры АПК
Fig. 2. Models for the formation of innovative infrastructure of the AIC

Таблица 1. Основные показатели развития сельского хозяйства Республики Беларусь, 2020–2024 гг.

Table 1. Key indicators of agricultural development in the Republic of Belarus, 2020–2024

Показатель	Год					2024 г. к 2020 г., %
	2020	2021	2022	2023	2024	
Число сельскохозяйственных организаций (на конец года), ед.	1 428	1 443	1 468	1 485	1 455	101,9
Число крестьянских (фермерских) хозяйств (на конец года), ед.	3 001	3 181	3 344	3 364	3 343	111,4
Продукция сельского хозяйства в хозяйствах всех категорий						
в текущих ценах, млн р.	23 630	26 142	31 845	33 319	36 772	155,6
в сопоставимых ценах, в % к предыдущему году	104,4	96,0	103,6	101,1	103,4	–1,0 п. п.
Списочная численность работников организаций сельского хозяйства в среднем за год, тыс. чел.	267,4	259,4	251,3	246,5	236,7	88,5
в % к общей численности работников по республике	7,2	7,1	7,0	6,9	6,7	–0,5 п. п.
Производительность труда в сельском хозяйстве, р./чел.	74 688	85 336	105 674	115 516	134 784	180,5
в сопоставимых ценах, в % к предыдущему году	110,0	100,5	105,7	104,0	110,2	0,2 п. п.
Валовая добавленная стоимость сельского хозяйства ¹ , млн р.	10 596	11 862,6	15 580,3	15 799,7	16 930,6	159,8
в % к валовому внутреннему продукту	7,1	6,7	8,1	7,3	6,9	–0,2 п. п.
в % к предыдущему году	104,8	95,9	102,6	100,0	102,2	–2,6 п. п.
Рентабельность продаж в сельском хозяйстве, %	5,3	6,1	9,3	6,4	6,1	0,8 п. п.
Экспорт сельскохозяйственной продукции и продуктов питания, млн долл. США	5 772	6 777	8 300	7 400	8 500	147,3
Инвестиции в основной капитал в сельское хозяйство						
в фактически действовавших ценах, млн р.	3 468,3	3 601,4	4 127,4	5 432,6	6 001,0	173,0
в процентах к общему объему инвестиций в основной капитал	11,7	11,6	14,5	14,5	12,7	1,0 п. п.
Основные средства в сельскохозяйственных организациях по первоначальной стоимости (на конец года), млн р.	34 730,4	37 210,0	55 188,7	61 597,0	69 688,1	200,6
Удельный вес накопленной амортизации в первоначальной стоимости основных средств в сельскохозяйственных организациях (на конец года), %	39,1	39,8	39,1	39,2	39,2	0,1 п. п.
Коэффициент обновления основных средств в сельскохозяйственных организациях	8,2	7,6	8,2	7,0	7,5	–0,7

Примечание. Таблица составлена авторами по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь.

Note. The table was compiled by the authors based on data from the National Statistical Committee of the Republic of Belarus.

по всей цепочке производства в земледелии, производстве кормов, животноводстве и переработке, а также за счет увеличения инвестиций в основной капитал сельского хозяйства почти в 2,0 раза в фактически действовавших ценах за исследуемый период (2020 г. – 3 468,3 млн р., 2022 г. – 4 127,4 млн р., 2024 г. – 6 001,0 млн р.) и стоимости основных средств в сельскохозяйственных организациях в 1,8 раза (2020 г. – 34 730,4 млн р., 2022 г. – 55 188,7 млн р., 2024 г. – 69 688,1 млн р.).

Одним из важнейших приоритетов в Республике Беларусь является развитие животноводства, переработки и реализация продукции животноводства. Установлено, что выполнение мероприятий Государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы² обеспечило

¹ Валовая добавленная стоимость по виду экономической деятельности «Сельское, лесное и рыбное хозяйство».

² О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 1 февр. 2021 г. № 59 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059> (дата обращения: 09.11.2025).

положительные тенденции развития данной отрасли. Рост валовой продукции сельского хозяйства в текущих ценах за 2021–2024 гг. по сравнению с 2020 г. составил 55,6 %, в том числе продукции животноводства – 58,3 %. В 2024 г. поголовье крупного рогатого скота (КРС) в сельскохозяйственных организациях, крестьянских (фермерских) хозяйства (К(Ф)Х) и хозяйствах населения составило 4 121 тыс. гол., 24 тыс. гол. и 56 тыс. гол. соответственно. На 1 января 2025 г. в республике работало 1 683 современных молочно-товарных комплекса, из которых больше 100 было построено в 2024 г. Производство молока в сельскохозяйственных организациях в 2024 г. составило 8 751 тыс. т, что на 998 тыс. т больше, чем в 2020 г., скота и птицы на убой (в живом весе) – 1 793,7 тыс. т, что на 38,9 тыс. т больше. Достижение подобных результатов во многом стало возможным благодаря современным технологиям, а именно внедрению компьютерной программы племенного учета, расчету геномного индекса, проведению исследований на подтверждение происхождения скота, изучению детерминированных заболеваний и аномалий животных.

Достигнутые объемы производства животноводческой продукции обеспечивают внутренние потребности страны. При этом в 2024 г. уровень самообеспечения молоком составил 291,9 % и по сравнению с 2020 г. вырос на 35,2 п. п., а мясом – 140,2 % и по сравнению с 2020 г. вырос на 4,3 п. п. Наряду с этим расширилась ассортиментная линейка мясной продукции за счет выпуска: 1) импортозамещающей продукции – сыровяленых изделий, аналогичных испанскому хамону (ОАО «Гродненский мясокомбинат», ОАО «Березовский мясоконсервный комбинат»); «Прошутто», ветчина «Пармская» (ОАО «Слонимский мясокомбинат», ОАО «Могилевский мясокомбинат»); 2) оригинальных продуктов из говядины (мясные чипсы, изделия в формах, колбасы в натуральной и искусственной оболочке) и твердокопченых колбас (продукция с длительным сроком хранения и ярко выраженным вкусом); 3) продукции специализированного (спортивного, детского) питания (ОАО «Савушкин продукт», ОАО «Волковысский мясокомбинат»).

Для оценки уровня сбалансированного развития организаций АПК нами разработана методика, представляющая собой поэтапный алгоритм последовательных действий по определению результативности стадий производственно-сбытовой цепочки субъектов с целью выработки направлений по повышению эффективности деятельности на инновационной основе (рис. 3).

Апробация разработки проводилась на примере: 1) сельскохозяйственных организаций системы Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь (Минсельхозпрод) – формируют сырьевую базу для обрабатывающей (пищевой) промышленности; 2) ОАО «Агрокомбинат «Юбилейный» – производит мясную продукцию замкнутого производственного цикла; 3) ОАО «Могилевский мясокомбинат» и ОАО «Бобруйский мясокомбинат» – мясоперерабатывающие организации Могилевской области.

Выполненный анализ и ранжирование 615 сельскохозяйственных организаций системы Минсельхозпрода показали, что средний критерий уровня их сбалансированного развития составил 1,0 (табл. 2). Наибольший удельный вес занимают субъекты со средним и выше среднего уровнем (27,8 % и 23,3 % соответственно), что является положительной тенденцией. При этом

Т а б л и ц а 2. Оценка уровня сбалансированного развития сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь, 2020–2024 гг.

Table 2. Assessment of the level of balanced development of agricultural organizations of the Republic of Belarus, 2020–2024

Группы организаций по интегральному индексу уровня сбалансированного развития	Уровень сбалансированного развития	Средний критерий уровня сбалансированного развития	Количество организаций в группе	Удельный вес организаций, %
≤0,980	Низкий	0,964	98	15,9
0,981–1,000	Ниже среднего	0,998	115	18,7
1,001–1,017	Средний	1,010	171	27,8
1,018–1,030	Выше среднего	1,024	143	23,3
≥1,031	Высокий	1,042	88	14,3
По совокупности	–	1,0	615	100,0

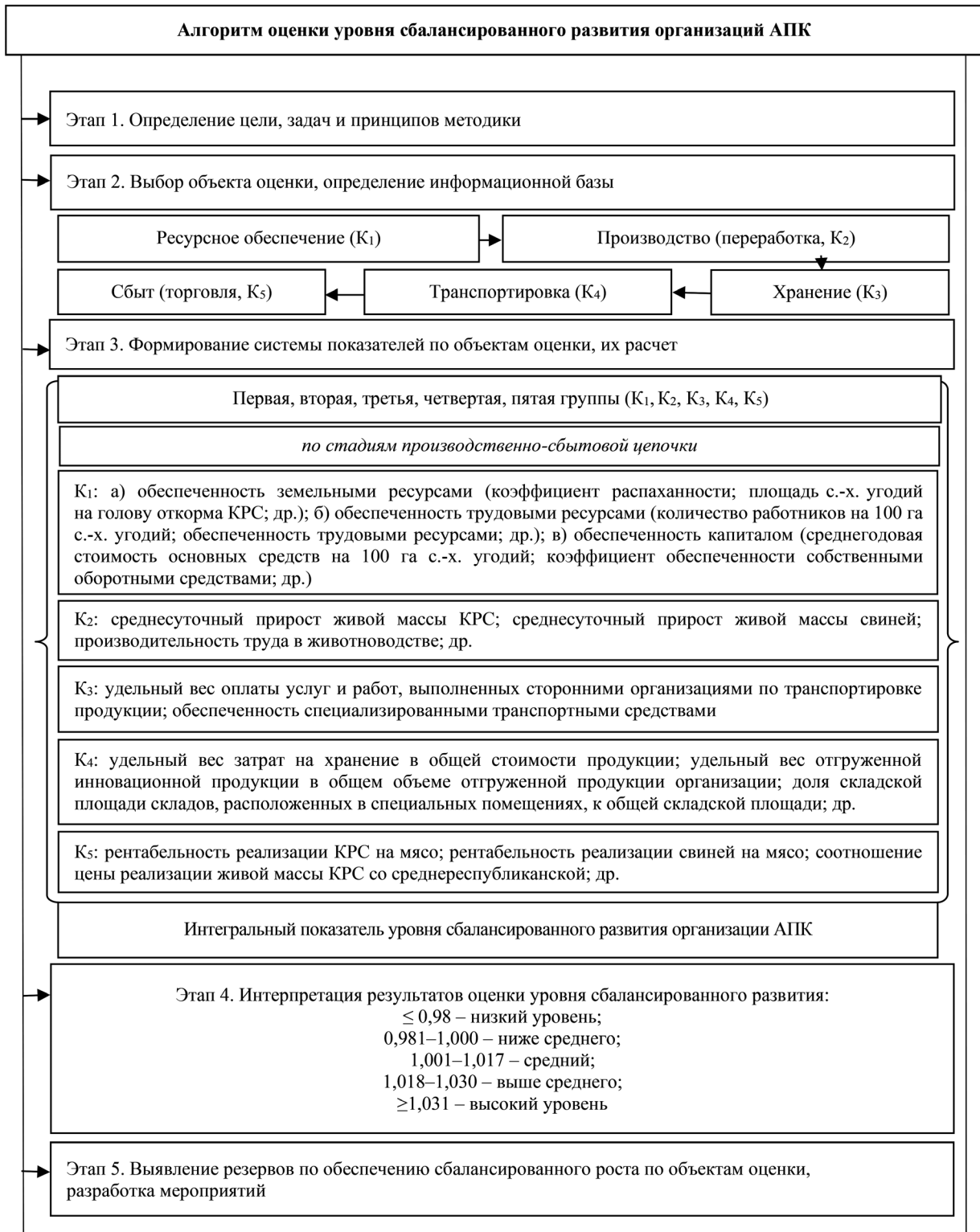


Рис. 3. Методика оценки уровня сбалансированного развития организаций АПК

Fig. 3. Methodology for assessing the level of balanced development of organizations of the AIC

на долю организаций с низким и ниже среднего уровнем приходится 15,9 и 18,7 % соответственно, а с высоким – 14,3 %.

Оценка сбалансированного развития ОАО «Агрокомбинат «Юбилейный» выявила, что все показатели организации находятся в пределах среднего уровня. В то же время интегральный индекс по сбыту (торговле) определен как ниже среднего, а по обеспечению капиталом – как высокий уровень. В целом интегральный индекс уровня сбалансированного развития агрокомбината составил более 1,0, что соответствует среднему уровню. Аналогичная ситуация характерна и для ОАО «Могилевский мясокомбинат», расчетные показатели которого находятся на уровне ниже среднего и среднего значения (0,985–1,020). В свою очередь, в ОАО «Бобруйский мясокомбинат» интегральные индексы по обеспечению капиталом и сбыту (торговле) находятся на высоком уровне; производству (переработке) – на уровне выше среднего; обеспечению трудовыми ресурсами – на среднем уровне. Интегральный индекс уровня сбалансированного развития организации составил 1,118 и подтверждает высокий уровень. В целом полученные результаты свидетельствуют о наличии резервов по повышению эффективности инновационной деятельности организаций АПК Республики Беларусь и необходимости выработки научно обоснованных мероприятий.

Стратегические меры по обеспечению сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь. Одной из задач функционирования эффективной системы управления АПК Республики Беларусь является обеспечение ее сбалансированности. На современном этапе для ее реализации требуется соответствующая стратегия, учитывающая характерные особенности и реальные возможности агропромышленного производства. Разработанная нами стратегия обеспечения сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь представляет собой совокупность целей, задач, принципов, условий, факторов и комплекс направлений по формированию и укреплению конкурентных преимуществ субъектов (рис. 4).

Научная новизна разработки заключается в методическом обосновании взаимосвязанных блоков мероприятий, включающих анализ условий и факторов построения стратегии, непосредственно ее разработку, контроль и внесение определенных корректив, а также организационные (внедрение ресурсосберегающих технологий в земледелие, новых инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции и глубокой переработки продовольственного сырья) и экономические инструменты управления (формирование развитой цифровой инфраструктуры АПК, подготовка руководителей и специалистов новой формации), применение которых в совокупности определяет четкое стратегическое видение эффективного инновационного развития субъектов.

В рамках предложенной стратегии нами дополнительно разработаны практические рекомендации по конкурентоустойчивому развитию и инфраструктурному обеспечению производителей мясной продукции, учитывающие модели формирования инновационной инфраструктуры АПК и методические подходы по оценке их эффективности, а также цели, основные положения принятых нормативных правовых и программных документов в Республике Беларусь. Практические рекомендации включают:

– концептуальную модель внедрения инновационных технологий по основным бизнес-процессам производителей мясной продукции (управление, развитие), предусматривающую их автоматизацию на основе использования специализированного программного обеспечения CRM. Научная новизна заключается в повышении управленческой эффективности, развитии инновационной деятельности и научно-исследовательских работ, обеспечении эффективности использования кадрового потенциала, расширении ассортимента и диверсификации рынков сбыта;

– систему комплексного мониторинга инновационной активности на микроуровне как средство получения статистически достоверной информации, составления краткосрочных и долгосрочных прогнозов для качественного управления процессом развития инновационной деятельности субъекта. В дополнение предложен методический подход определения совокупного эффекта от внедрения инновационных технологий в деятельности организаций, осуществляющих произ-

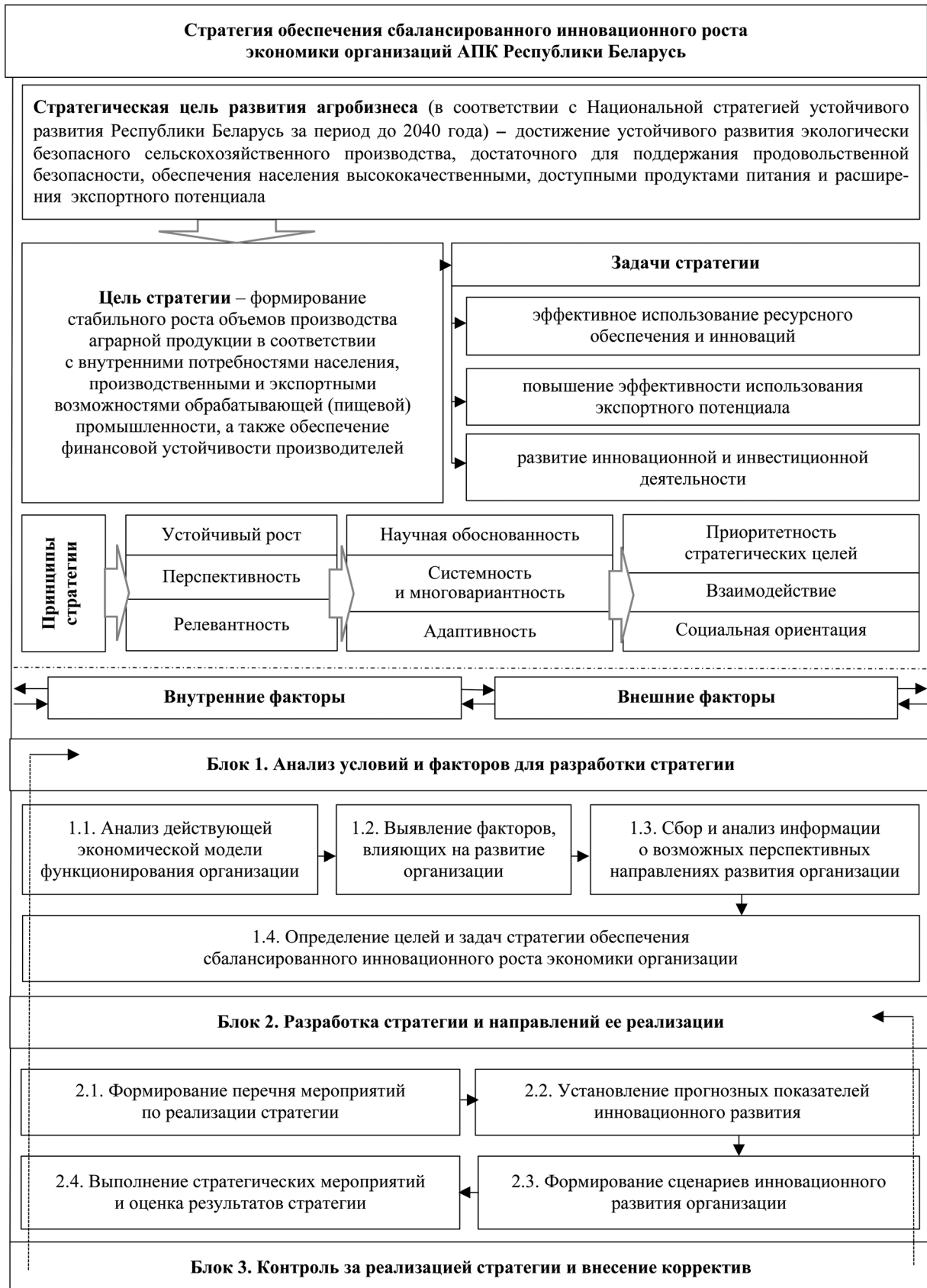


Рис. 4. Стратегия обеспечения сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь

Fig. 4. Strategy for ensuring balanced innovative economic growth of organizations of the AIC in the Republic of Belarus

водство мясной продукции, предусматривающий оценку на микро-, мезо- и макроуровнях, а также расчет экономической, экологической и социальной эффективности;

– создание инновационной электронной площадки на основе роботизированной eCommerce-платформы «1С-Битрикс24: Интернет-магазин + CRM», представляющей собой специализированный онлайн-ресурс, который обеспечивает прозрачную и надежную CRM-систему контроля качества и отзывов покупателей, осуществления деловой коммуникации, проведения аналитической работы по изучению рынка и выставочно-ярмарочной деятельности. Данную разработку предлагаем внедрять на базе мясоперерабатывающих организаций.

Таким образом, комплексное применение рекомендаций позволяет создать благоприятные условия по сбалансированному инновационному росту на основе усиления конкурентных преимуществ субъектов на внутреннем и внешнем рынках.

Выводы. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Выполнено теоретическое обоснование сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК, позволившее выделить и систематизировать исторические этапы развития научных концепций и классических школ экономической теории, а также обосновать современные подходы к определению сущности категорий «сбалансированность», «сбалансированный рост», «сбалансированное развитие». Дополнительно разработана авторская классификация отраслевых и товарных факторов (биологические, ресурсно-технические, трудовые, инновационные, производственно-экономические), а также выделены применяемые в отечественной и зарубежной практике модели формирования инновационной инфраструктуры (производственная, сбытовая, социальная, рыночная), что позволило определить основные подходы к экономической оценке эффективности их функционирования.

2. Разработана и апробирована методика оценки уровня сбалансированного развития организаций АПК, базирующаяся на системном подходе и характеризующаяся комплексом оценочных показателей для сельскохозяйственных организаций, агрохолдингов и агрокомбинатов, обрабатывающих (пищевых) организаций. Научная новизна предлагаемой разработки состоит в использовании поэтапного алгоритма, позволяющего определять уровень сбалансированного развития по стадиям производственно-сбытовой цепочки (низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий уровни), а также выявлять резервы по объектам оценки, разрабатывать мероприятия по повышению эффективности инновационной деятельности.

3. В качестве стратегических мер по обеспечению сбалансированного инновационного роста экономики организаций АПК Республики Беларусь разработана соответствующая стратегия и практические рекомендации, включающие концептуальную модель внедрения инновационных технологий по основным бизнес-процессам производителей аграрной продукции, систему комплексного мониторинга инновационной активности организаций, инновационную электронную площадку, что в совокупности создает благоприятные условия по повышению эффективности деятельности субъектов и усилению их конкурентных преимуществ на рынке.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках Государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма 9.7 «Экономика АПК».

Acknowledgments. The study was carried out within the framework of the State Scientific Research Program «Agricultural Technologies and Food Security» for 2021–2025, Subprogram 9.7 «Economics of the Agro-Industrial Complex».

Список использованных источников

1. Кенэ, Ф. Избранные экономические произведения: [пер. с фр.] / Ф. Кенэ; [ред.-сост. А. И. Казарин]. – М.: Соцэкгиз, 1960. – 551 с.
2. Маркс, К. Капитал. Критика политической экономии: в 3 т. / К. Маркс; пер. И. И. Скворцова-Степанова; предисл. Ф. Энгельса. – М.: Политиздат, 1973. – Т. 1, кн. 1: Процесс производства капитала. – VIII, 970 с.
3. Ризванова, М. А. Применение модели межотраслевого баланса В. Леонтьева в прогнозировании экономики / М. А. Ризванова // Вестник Башкирского университета. – 2015. – Т. 20, № 3. – С. 927–931.
4. Фельдман, Г. А. К теории темпов народного дохода / Г. А. Фельдман // Плановое хозяйство. – 1928. – № 11. – С. 146–170.

5. Фельдман, Г. А. К теории темпов народного дохода / Г. А. Фельдман // Плановое хозяйство. – 1928. – № 12. – С. 151–178.
6. Harrod, R. F. An essay in dynamic theory / R. F. Harrod // The Economic Journal. – 1939. – Vol. 49, № 193. – P. 14–33. <https://doi.org/10.2307/2225181>
7. Domar, E. D. Capital expansion, rate of growth and employment / E. D. Domar // Econometrica. – 1946. – Vol. 14, № 2. – P. 137–147. <https://doi.org/10.2307/1905364>
8. Domar, E. D. The “burden of the debt” and the national income / E. D. Domar // The American Economic Review. – 1944. – Vol. 34, № 4. – P. 798–827.
9. Аганбегян, А. Г. О сбалансированности уровня экономического развития и социальной сферы / А. Г. Аганбегян // SPERO. – 2011. – № 14. – С. 7–20.
10. Быков, А. А. Вклад отраслей в сбалансированный рост белорусской экономики / А. А. Быков, Т. В. Хвалько // Белорусский экономический журнал. – 2017. – № 2 (79). – С. 4–20.
11. Быков, А. А. Сбалансированный рост и структурная политика: мировые тенденции и опыт Республики Беларусь / А. А. Быков, О. А. Горлова, Т. В. Хвалько // Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник / Ин-т науч. информ. по обществ. наукам. – М., 2017. – Вып. 12, ч. 1. – С. 459–469.
12. Заборовский, А. М. Новые инструменты экономической политики для сбалансированного роста белорусской экономики / А. М. Заборовский // Экономический бюллетень Научно-исследовательского экономического института Министерства экономики Республики Беларусь. – 2014. – № 12. – С. 11–15.
13. Клейнер, Г. Микроэкономические факторы и ограничения экономического роста / Г. Клейнер // Проблемы теории и практики управления. – 2004. – № 5. – С. 28–33.
14. Макроэкономические аспекты обеспечения сбалансированности национальной экономики / НАН Беларуси, Ин-т экономики; под общ. ред. А. И. Лученка. – Мн.: Бел. наука, 2015. – 271 с.
15. Пинигин, В. В. О некоторых источниках экономического роста в Беларуси / В. В. Пинигин // Экономический бюллетень Научно-исследовательского экономического института Министерства экономики Республики Беларусь. – 2017. – № 12. – С. 26–31.
16. Филипцов, А. М. Уровень инновационности экономического роста в Республике Беларусь / А. М. Филипцов // Белорусский экономический журнал. – 2016. – № 2 (75). – С. 82–92.
17. Филипцов, А. М. Факторы экономического роста в Республике Беларусь / А. М. Филипцов // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. – Мн., 2016. – Вып. 9. – С. 366–371.
18. Позамантир, Э. И. Вычислимое общее равновесие экономики и транспорта. Транспорт в динамическом межотраслевом балансе / Э. И. Позамантир. – М.: Поли Принт Сервис, 2014. – 141 с.
19. Попков, Ю. С. Теория макросистем: равновесные модели / Ю. С. Попков. – М.: Либроком, 2015. – 320 с.
20. Мищенко, А. С. Обеспечение сбалансированного экономического роста строительного комплекса Республики Беларусь: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Мищенко Артем Сергеевич; Бел. гос. экон. ун-т. – Мн., 2021. – 24 с.
21. Мордвинов, С. В. Методы оценки сбалансированности развития промышленных предприятий: на примере предприятий лесопромышленного комплекса: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Мордвинов Сергей Витальевич; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – Красноярск, 2004. – 24 с.
22. Савицкая, Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: учебник / Г. В. Савицкая. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 535 с.
23. Семенова, Е. В. Формирование стратегии сбалансированного развития промышленного холдинга на основе комплексной оценки его экономической деятельности: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Семенова Елена Владимировна; Самар. гос. экон. ун-т. – Самара, 2012. – 24 с.
24. Шеремет, А. Д. Комплексный анализ показателей устойчивого развития предприятия / А. Д. Шеремет // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – № 45 (396). – С. 2–10.
25. Бельский, В. И. Экономический механизм государственного регулирования сельскохозяйственного производства: теория, методология, практика / В. И. Бельский. – Мн.: Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2018. – 265 с.
26. Гусаков, В. Г. Новейшая экономика и организация сельского хозяйства в условиях становления рынка: научный поиск, проблемы, решения / В. Г. Гусаков. – Мн.: Бел. наука, 2008. – 431 с.
27. Киреенко, Н. В. Современные тренды инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь / Н. В. Киреенко // Агропанорама. – 2025. – № 3 (169). – С. 40–44. <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-169-3-40-44>
28. Механизмы устойчивого инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь / Н. В. Киреенко, И. А. Войтко, Н. С. Яковчик [и др.]. – Мн.: БГАТУ, 2024. – 203 с.
29. Пакуш, Л. В. Рекомендации по обеспечению устойчивого развития мясоперерабатывающих организаций АПК / Л. В. Пакуш, А. В. Ефименко // Сборник научных трудов «Проблемы экономики». – 2017. – № 2 (25). – С. 116–127.
30. Войтко, И. А. Сценарии развития сельского хозяйства Республики Беларусь в условиях сближения продовольственных систем Беларуси и России / И. А. Войтко // Агропанорама. – 2025. – № 5 (171). – С. 37–43. <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-171-5-37-43>
31. Грибов, А. В. Перспективы развития специализированного мясного скотоводства в Республике Беларусь / А. В. Грибов // Сборник научных трудов «Проблемы экономики». – 2016. – № 1 (22). – С. 45–54.

32. Комков, В. Экономический рост при нулевом качестве: особенности и последствия / В. Комков // Банкаўскі веснік. – 2021. – № 3 (692). – С. 3–10.
33. Кейнс, Дж. М. Общая теория занятости, процента и денег: избранное: [пер. с англ.] / Дж. М. Кейнс. – М.: Эксмо, 2009. – 957 с.
34. Шумпетер, Й. Теория экономического развития: (исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры) / Й. Шумпетер; пер. с нем. В. С. Автономова [и др.]. – М.: Прогресс, 1982. – 455 с.
35. Kling, R. IT and organizational change in digital economies: a sociotechnical approach / R. Kling, R. Lamb // *Understanding the digital economy* / ed.: E. Brynjolfsson, B. Kahin. – Cambridge, 2000. – P. 295–324. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6986.003.0017>
36. Сызранцев, Г. А. Классификация факторов инновационного роста, определение типа инновационного роста и присущих ему форм / Г. А. Сызранцев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 214–218.
37. Сафронов, А. С. Моделирование инновационного роста: учеб. пособие / А. С. Сафронов. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 62 с.
38. Федорова, К. П. Инновационный экономический рост: проблемы и возможности реализации: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.01 / Федорова Кристина Петровна; С.-Петерб. гос. инженер.-экон. ун-т. – СПб., 2011. – 19 с.
39. Рахмеева, И. И. Региональные особенности развития и пространственной организации производственной инновационной инфраструктуры: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Рахмеева Ирина Игоревна. – Екатеринбург, 2014. – 180 л.
40. Сайфулина, А. Ф. Развитие производственной инфраструктуры в условиях цифровой экономики / А. Ф. Сайфулина, Р. А. Исломов // *Economics*. – 2021. – № 1 (48). – С. 5–7.
41. Хайруллина, А. Р. Цифровая инфраструктура как среда принятия управленческих решений в малом и среднем предпринимательстве / А. Р. Хайруллина // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Т. 11, № 5. – С. 1151–1166. <https://doi.org/10.18334/epp.11.5.112066>
42. Киреенко, Н. В. Механизм трансформации производственно-сбытовой системы АПК Республики Беларусь в условиях цифровой экономики / Н. В. Киреенко, К. В. Борель // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя аграрных навук*. – 2025. – Т. 63, № 2. – С. 95–114. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-95-114>
43. Гусарова, Т. В. Модели формирования инфраструктуры сбалансированного экономического роста производства мясной продукции / Т. В. Гусарова // *Агропанорама*. – 2025. – № 1 (167). – С. 37–41. <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-167-1-37-41>

References

1. Quesnay F. *Selected economic works*. Moscow, Sotsekgiz Publ., 1960. 551 p. (in Russian).
2. Marx K. *Capital. A critique of political economy. Vol. 1, bk. 1. The process of production of capital*. New York, Modern Library, 1906. 869 p.
3. Rizvanova M. A. The use of the leontief inter-industry balance model in forecasting. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2015, vol. 20, no. 3, pp. 927–931 (in Russian).
4. Feldman G. A. Towards the theory of national income growth rates. *Planovoe khozyaistvo* [Planned Economy], 1928, no. 11, pp. 146–170 (in Russian).
5. Feldman G. A. Towards the theory of national income growth rates. *Planovoe khozyaistvo* [Planned Economy], 1928, no. 12, pp. 151–178 (in Russian).
6. Harrod R. F. An essay in dynamic theory. *The Economic Journal*, 1939, vol. 49, no. 193, pp. 14–33. <https://doi.org/10.2307/2225181>
7. Domar E. D. Capital expansion, rate of growth and employment. *Econometrica*, 1946, vol. 14, no. 2, pp. 137–147. <https://doi.org/10.2307/1905364>
8. Domar E. D. The “burden of the debt” and the national income. *The American Economic Review*, 1944, vol. 34, no. 4, pp. 798–827.
9. Aganbegyan A. G. On the balance between the level of economic development and the social sphere. *SPERO*, 2011, no. 14, pp. 7–20 (in Russian).
10. Bykov A. A., Khvalko T. V. Contribution of sectors to the balanced growth of the Belarusian economy. *Belorusskii ekonomicheskii zhurnal = Belarusian Economic Journal*, 2017, no. 2 (79), pp. 4–20 (in Russian).
11. Bykov A. A., Gorlova O. A., Khvalko T. V. Balanced growth and structural policy: global trends and experience of the Republic of Belarus. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya: ezhegodnik* [Russia: development trends and prospects: yearbook]. Moscow, 2017, iss. 12, pt. 1, pp. 459–469 (in Russian).
12. Zaborovskii A. M. New instruments of economic policy for balanced growth of the Belarusian economy. *Ekonomicheskii byulleten' Nauchno-issledovatel'skogo ekonomicheskogo instituta Ministerstva ekonomiki Respubliki Belarus'* [Economic Bulletin of the Economic Research Institute of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus], 2014, no. 12, pp. 11–15 (in Russian).
13. Kleiner G. Microeconomic factors and economic growth limitations. *Problemy teorii i praktiki upravleniya = International Journal of Management Theory and Practice*, 2004, no. 5, pp. 28–33 (in Russian).

14. Luchenok A. I. (ed.). *Macroeconomic aspects of ensuring the balance of the national economy*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 271 p. (in Russian).
15. Pinigin V. V. On some sources of economic growth in Belarus. *Ekonomicheskii byulleten' Nauchno-issledovatel'skogo ekonomicheskogo instituta Ministerstva ekonomiki Respubliki Belarus'* [Economic Bulletin of the Economic Research Institute of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus], 2017, no. 12, pp. 26–31 (in Russian).
16. Filiptsov A. M. Innovation economic growth in the Republic of Belarus. *Belorusskii ekonomicheskii zhurnal = Belarusian Economic Journal*, 2016, no. 2 (75), pp. 82–92 (in Russian).
17. Filiptsov A. M. The factors of economic growth in the Republic of Belarus. *Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Scientific Works of the Belarusian State Economic University]. Minsk, 2016, iss. 9, pp. 366–371 (in Russian).
18. Pozamantir E. I. *Computable general equilibrium of the economy and transport. Transport in the dynamic interindustry balance*. Moscow, Poli Print Servis Publ., 2014. 141 p. (in Russian).
19. Popkov Yu. S. *Theory of macrosystems: equilibrium models*. Moscow, Librokom Publ., 2015. 320 p. (in Russian).
20. Mishchenko A. S. *Ensuring balanced economic growth of the construction complex of the Republic of Belarus*. Minsk, 2021. 24 p. (in Russian).
21. Mordvinov S. V. *Methods for assessing the balance of industrial enterprise development: on the example of forestry complex enterprises*. Krasnoyarsk, 2004. 24 p. (in Russian).
22. Savitskaya G. V. *Analysis of economic activity of the enterprise*. 5th ed. Moscow, INFRA-M Publ., 2009. 535 p. (in Russian).
23. Semenova E. V. *Forming a strategy for balanced development of an industrial holding based on a comprehensive assessment of its economic activity*. Samara, 2012. 24 p. (in Russian).
24. Sheremet A. D. A complex analysis of sustainable development indicators of an enterprise. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2014, no. 45 (396), pp. 2–10 (in Russian).
25. Bel'skii V. I. *Economic mechanism of state regulation of agricultural production: theory, methodology, practice*. Minsk, Institute for System Research in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018. 265 p. (in Russian).
26. Gusakov V. G. *The latest economics and organization of agriculture in the context of market formation: scientific search, problems, solutions*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2008. 431 p. (in Russian).
27. Kireyenka N. V. Modern trends of innovative development of agricultural business in the Republic of Belarus. *Agropanorama*, 2025, no. 3 (169), pp. 40–44 (in Russian). <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-169-3-40-44>
28. Kireyenka N. V., Voitko I. A., Yakovchik N. S., Gorodetskaya E. A., Shestakov Yu. N. *Mechanisms of sustainable innovative development of the agrarian business of the Republic of Belarus*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2024. 203 p. (in Russian).
29. Pakush L. V., Efimenko A. V. Recommendations for ensuring sustainable development of meat-processing organization in AIC. *Sbornik nauchnykh trudov "Problemy ekonomiki"* [Collection of scientific papers "Problems of Economics"], 2017, no. 2 (25), pp. 116–127 (in Russian).
30. Voitko I. A. Scenarios for the development of agriculture in the Republic of Belarus under conditions of convergence of the food systems of Belarus and Russia. *Agropanorama*, 2025, no. 5 (171), pp. 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-171-5-37-43>
31. Gribov A. V. Prospects of development of specialized beef cattle breeding in the Republic of Belarus. *Sbornik nauchnykh trudov "Problemy ekonomiki"* [Collection of scientific papers "Problems of Economics"], 2016, no. 1 (22), pp. 45–54 (in Russian).
32. Kamkou V. Economic growth at zero quality: peculiarities and consequences. *Bankauski vesnik* [Banking Bulletin], 2021, no. 3 (692), pp. 3–10 (in Russian).
33. Keynes J. *The general theory of employment, interest and money: the selected works*. London, Macmillan, 1936. 403 p.
34. Schumpeter J. *The theory of economic development: (an inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle)*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1961. 255 p.
35. Kling R., Lamb R. IT and organizational change in digital economies: a sociotechnical approach. *Understanding the digital economy*. Cambridge, 2000, pp. 295–324. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6986.003.0017>
36. Syzrantsev G. A. Classification factors innovative growth definition type of innovation growth and its inherent form. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 6, pp. 214–218 (in Russian).
37. Safronov A. S. *Modeling of innovative growth*. 2nd ed. Samara, Publishing house of the Samara State Aerospace University, 2015. 62 p. (in Russian).
38. Fedorova K. P. *Innovative economic growth: problems and possibilities of implementation*. St. Petersburg, 2011. 19 p. (in Russian).
39. Rakhmeeva I. I. *Regional features of development and spatial organization of production innovation infrastructure*. Yekaterinburg, 2014. 180 p. (in Russian).
40. Sayfulina A. F., Islomova R. A. Development of production infrastructure in the conditions of the digital economy. *Economics*, 2021, no. 1 (48), pp. 5–7 (in Russian).
41. Khayrullina A. R. Digital infrastructure as a management decision-making environment in small and medium-sized enterprises. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo = Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1151–1166 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/epp.11.5.112066>

42. Kireyenka N. V., Borel K. V. Mechanism of transformation of production and marketing system of agro-industrial complex of the Republic of Belarus in the context of digital economy. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2025, vol. 63, no. 2, pp. 95–114 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-95-114>

43. Gusarova T. V. Models for forming the infrastructure of balanced economic growth in meat production. *Agropanorama*, 2025, no. 1 (167), pp. 37–41 (in Russian). <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-167-1-37-41>

Информация об авторах

Киреенко Наталья Владимировна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономической теории и права, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: natallia_kireenko@mail.ru

Гусарова Татьяна Викторовна – старший преподаватель кафедры бухгалтерского учета, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (ул. Мичурина, 5, 213407, Горки, Могилевская область, Республика Беларусь). E-mail: gustat84@yandex.by

Information about the authors

Natallia V. Kireyenka – Dr. Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of Economic Theory and Law, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: natallia_kireenko@mail.ru

Tatsiana V. Husarava – Senior Lecturer of the Accounting Department, Belarusian State Agricultural Academy (5, Michurin St., 213407, Gorki, Mogilev Region, Republic of Belarus). E-mail: gustat84@yandex.by

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА
AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК [634.13:631.526.32]:581.143.6(476)
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-111-127>

Поступила в редакцию 19.08.2025
Received 19.08.2025

Е. В. Колбанова, Н. В. Кухарчик, Т. Н. Божидай

*Институт плодородства, Национальная академия наук Беларуси, Самохваловичи,
Республика Беларусь*

**РИЗОГЕНЕЗ *IN VITRO* И АДАПТАЦИЯ *EX VITRO* СОРТОВ ГРУШИ,
РАЙОНИРОВАННЫХ В БЕЛАРУСИ**

Аннотация. Объектами исследований стали 7 районированных в Республике Беларусь сортов груши, в том числе 6 белорусской селекции (Белорусская поздняя, Купала, Просто Мария, Спакуса, Ясачка, Кудесница) и интродуцированный сорт Талгарская красавица. При одноэтапном укоренении сортов груши использование среды DKW с уменьшенной концентрацией макросолей (¼), микросолей (½), железа (60 мг/л Ferric-EDDHA), сахарозы (2 %), дополненной 1,0 мг/л ИМК, позволяет получить 27,0 % укорененных растений сорта Белорусская поздняя, 43,0 % – Кудесница, 73,0 % – Просто Мария, 33,0 % – Талгарская красавица и 63,0 % – Ясачка. Для сортов Купала и Спакуса добавление ИМК в концентрации 0,2 мг/л обеспечивает 89,0 и 90,0 % соответственно укорененных растений без образования мягкого каллуса у основания побегов. Двухэтапная схема укоренения (темновая фаза – 7 дней – на агаризованной среде MS с концентрацией макросолей ½ или ¼, микросолей ½, сахарозы 2 %, ИМК 3 или 5 мг/л и последующее культивирование при освещении в течение 6 недель на безгормональной среде того же минерального состава, что и в темновую фазу, с добавлением вермикулита или без вермикулита) позволяет получить высокий процент укорененных растений-регенерантов у всех сортов. Эффективность адаптации *ex vitro* растений-регенерантов груши составила 92,9–100,0 % при применении стерильного субстрата торф : агроперлит (1 : 1). Увеличить количество адаптированных растений сортов груши можно за счет посадки в субстрат не только укорененных *in vitro* растений-регенерантов, но и растений, которые не дали корней при культивировании на среде, содержащей ИМК. У сортов Спакуса, Купала, Ясачка 79,0–88,0 % неукорененных микропобегов давали корни при посадке в стерильный субстрат. У сортов Талгарская красавица, Кудесница и Белорусская поздняя данный показатель колебался от 18,0 до 25,0 %, у сорта Просто Мария достигал 44,0 %.

Ключевые слова: *Pyrus*, ризогенез *in vitro*, адаптация *ex vitro*, питательная среда, DKW, MS

Для цитирования: Колбанова, Е. В. Ризогенез *in vitro* и адаптация *ex vitro* сортов груши, районированных в Беларуси / Е. В. Колбанова, Н. В. Кухарчик, Т. Н. Божидай // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 111–127. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-111-127>

Elena V. Kolbanova, Natallia V. Kukharchyk, Tatsiana N. Bazhydai

Institute for Fruit Growing, National Academy of Sciences of Belarus, Samokhvalovichy, Republic of Belarus

***IN VITRO* RHIZOGENESIS AND *EX VITRO* ADAPTATION OF PEAR CULTIVARS REGIONALIZED
IN BELARUS**

Abstract. The objects of study were 7 pear cultivars zoned in the Republic of Belarus including 6 cultivars of Belarusian selection (Belorusskaya Pozdnyaya, Kupala, Prosto Maria, Spakusa, Yasachka, Kudesnitsa) and introduced cultivar (Talgarskaya Krasavitsa). At one-stage rooting of pear cultivars, the use of DKW medium with a reduced concentration of macrosalts (¼), macrosalts (½), iron (60 mg/l Ferric-EDDHA), sucrose (2 %), supplemented with 1.0 mg/l IBA allows to obtain 27.0 % of rooted plants of cv. Belorusskaya Pozdnyaya, 43.0 % of cv. Kudesnitsa, 73.0 % of cv. Prosto Maria, 33.0 % of cv. Talgarskaya Krasavitsa, and 63.0 % of cv. Yasachka. For cultivars Kupala and Spakusa, the use of 0.2 mg/l IBA provides 89.0 and 90.0 %, respectively, rooted plants without formation of soft callus at the base of shoots. The use of two-stage rooting schemes (dark phase (7 days) on MS agar medium with concentration of macrosalts (½ or ¼), macrosalts (½), sucrose (2 %), IBA (3 or 5 mg/l), and subsequent cultivation under illumination (6 weeks) on a hormone-free medium of the same mineral composition

as in dark phase, with or without vermiculite) allows obtaining the high percentage of rooted microplants in all cultivars. The efficiency of *ex vitro* adaptation of pear regenerated plants was 92.9–100.0 % when using a sterile peat : agropertilite (1 : 1) substrate. The number of adapted plants of pear cultivars can be increased by planting in the substrate not only *in vitro* rooted regenerated plants, but also plants that did not produce roots when cultivated on medium containing IBA. For cultivars Spakusa, Kupala, Yasachka 79.0–88.0 % of unrooted microshoots produced roots when planted in sterile substrate. For cultivars Talgarskaya Krasavitsa, Kudesnitsa, and Belorusskaya Pozdnyaya rooting rate varied from 18.0 to 25.0 %, for Prosto Maria – 44.0 %.

Keywords: *Pyrus*, *in vitro* rhizogenesis, *ex vitro* adaptation, nutrient medium, DKW, MS

For citation: Kolbanova E. V., Kukharchyk N. V., Bazhydai T. N. *In vitro* rhizogenesis and *ex vitro* adaptation of pear cultivars regionalized in Belarus. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 111–127 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-111-127>

Введение. Для укоренения представителей рода *Pyrus* часто применяют одноэтапную схему укоренения с питательной средой Мурасиге и Скуга (MS), полной [1–7] или разбавленной в 2 [8–18] или 3 раза [19, 20], а также с уменьшением концентрации сахарозы до 1,5–2 % [14, 15, 17, 20, 21]. В качестве стимуляторов ризогенеза применяют ИМК [3, 4, 7–9, 13, 16, 20, 22–23], НУК [2–3, 8, 14, 19–22], реже ИУК [5, 15, 22]. При одноэтапной схеме укоренения выдержка микропобегов в темноте в течение 7–9 дней при комнатной температуре требовалась для успешного укоренения сортов *P. communis* Passe-Crassane [19], Conference [21, 24], Durondeau, Doyenné du Comice, Professeur Molon [21].

Некоторые ученые использовали для укоренения представителей рода *Pyrus* двухэтапную схему укоренения. Стопроцентное укоренение было получено у побегов сорта *P. communis* Bartlett × La France при выдерживании их в темноте в течение 7 дней на среде MS с 0,2 мг/л ИМК и при последующем культивировании на безгормональной среде, однако отмечено формирование каллуса у побегов [6]. При укоренении подвоев *P. communis* ОН × F69, ОН × F40 и ОН × F87 лучшие результаты получены при посадке растений на среду ½ MS, содержащую 2 мг/л ИМК (в течение 7 дней в темноте или на свету), с последующим культивированием на безгормональной среде. Необходимость темновой фазы инициации корней отмечена для подвоев груши *P. communis* ОН × F69, но не требовалась для ОН × F40 и ОН × F87 [11]. Максимальная эффективность укоренения мутации сорта Dr. Jules Guyot *P. communis* получена исследователями при культивировании побегов на среде ½ MS с 2 мг/л ИМК в течение 5 дней на свету и с последующим переносом на безгормональную среду ½ MS без вермикулита (82,0 %) или с вермикулитом (81,9 %). При уменьшении времени культивирования на среде с 2 мг/л ИМК с 5 до 2 дней процент укоренения снижался с 81,9 до 40,0 [16]. В [25] отмечена 85–100%-я эффективность укоренения сортов *P. communis* Выжница, Львовский сувенир, Роксолана, Христианка, Черемшина, Этюд при культивировании на среде ½ MS с 0,3–1,0 мг/л ИМК в течение 2–3 дней, а затем на среде аналогичного состава, не содержащей ИМК, в то время как эффективность укоренения при одностадийной схеме была в 1,5–2 раза ниже.

Таким образом, укоренение сортов груши очень сложный этап, имеющий видовую и сортовую специфичность. Данный факт подтверждается результатами [24], согласно которым из 10 сортов *P. communis* успешное укоренение отмечено только у сорта Conference. В [26] сообщается об отсутствии положительного эффекта при работе с микрочеренками *P. calleryana* Bradford даже после двух лет исследований. В работе [27] изучалась укореняемость 49 видов и сортов *Pyrus*: 28 образцов, в основном сорта *P. communis* (25), укореняются лучше всего (50 %). У микропобегов *P. betulaefolia*, *P. calleryana*, *P. hondoensis*, *P. koehnei*, *P. pashia*, *P. pyrifolia*, *P. regelii*, *P. ussuriensis* не было получено корней ни в одном из вариантов обработок [27].

Влияние генотипа на результативность адаптации *ex vitro* сортов яблони и груши отмечается в [7]. С аналогичными трудностями столкнулся и автор работы [22] при адаптации *ex vitro* сортов груши: эффективность не превышала 60–80 %. Около 50 % растений было получено у сортов Durondeau, Conference, Doyenné du Comice, Professeur Molon [21]. Эффективность адаптации составила около 50 % у сортов *P. communis* William's Bon Chrétien, Packam's Triumph and Beurré Bosc при использовании смеси стерильного торфа и перлита (1 : 1) [3]; 83 % у сорта Williams – на стерильном вермикулите [20]; 90 % у сорта Conference – на смеси торфа и перлита (1 : 5) [15]; 79 % у мутации сорта Dr. Jules Guyot (*P. communis*) – на смеси стерильного торфа, перлита

и песка (1 : 1 : 1) [16]; 61,5 % у подвоя *P. Calleryana* D-6 – на смеси торфа и перлита (8 : 2) [10]; 90 % у подвоя *P. communis* Rygodwarf – на кокосовом торфе и перлите (3 : 1) [5]. Для адаптации сеянцев *P. calleryana* использовали смесь торфа, песка и агроперлита (6 : 3 : 1) [14], сортов *P. communis* Выжница, Львовский сувенир, Роксолана, Христианка, Черемшина – смесь торфа, перлита и песка (4 : 1 : 1) [25], сорта *P. communis* Passe-Crassane – вермикулит [19].

Цель исследования – выявить особенности ризогенеза *in vitro* и адаптации *ex vitro* районированных в Республике Беларусь сортов груши.

Материалы и методы. Исследования проводили в отделе биотехнологии РУП «Институт плодоводства» в 2019–2024 гг. Объектами исследований стали растения-регенеранты сортов груши Белорусская поздняя, Купала, Просто Мария, Спакуса, Ясачка (*P. communis* × *P. ussuriensis*), Кудесница (*P. communis* × *P. pyrifolia*) и интродуцированный сорт Талгарская красавица (*P. communis* × *P. pyrifolia*).

Схема I. Одноэтапное укоренение с использованием агаризованной среды **D** в течение 4 недель при фотопериоде 16/8 ч.

D: ¼ макросоли по Driver and Kuniyuki Walnut medium (DKW), ½ микросоли по DKW, Ferric-EDDHA (Duchefa Biochemie) – 60 мг/л, витамины по DKW, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: **D б/г** (без добавления β-индолилмасляной кислоты (ИМК)); **D 0,1** (добавление ИМК в концентрации 0,1 мг/л); **D 0,2** (0,2 мг/л ИМК); **D 0,3** (0,3 мг/л ИМК); **D 0,5** (0,5 мг/л ИМК); **D 0,6** (0,6 мг/л ИМК); **D 0,8** (0,8 мг/л ИМК); **D 1,0** (1,0 мг/л ИМК).

Схема II. Одноэтапное укоренение. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной среды ½ **MS** и ½ **MS ma** и последующее культивирование на этих же средах в течение 3 недель при фотопериоде 16/8 ч.

½ **MS:** ½ макро- и микросоли по MS, ½ FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: ½ **MS 0** (без добавления ИМК); ½ **MS 0,2** (0,2 мг/л ИМК); ½ **MS 0,3** (0,3 мг/л ИМК).

½ **MS ma:** ½ макросоли по MS, микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: ½ **MS ma 0** (без добавления ИМК); ½ **MS ma 0,2** (0,2 мг/л ИМК); ½ **MS ma 0,3** (0,3 мг/л ИМК).

Схема III. Двухэтапное укоренение. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной среды **MS**, дополненной тремя концентрациями ИМК, последующее культивирование на безгормональной среде ½ **MS б/г** в течение 42 дней при фотопериоде 16/8 ч.

MS: макро- и микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: **MS 1,0** (добавление ИМК в концентрации 1,0 мг/л); **MS 1,5** (1,5 мг/л ИМК); **MS 3,0** (3,0 мг/л ИМК).

½ **MS б/г:** ½ макро- и микросоли по MS, ½ FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8.

Схема IV. Двухэтапное укоренение. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной среды **MS**, дополненной высокими концентрациями ИМК, последующее культивирование на безгормональной среде ¼ **DKW б/г** в течение 42 дней при фотопериоде 16/8 ч.

MS: макро- и микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: **MS 3,0** (добавление ИМК в концентрации 3,0 мг/л); **MS 5,0** (5,0 мг/л ИМК).

¼ **DKW б/г:** ¼ макросоли по DKW, микросоли по DKW, FeNa-EDTA по DKW, витамины по DKW, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8.

Схема V. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной среды **2MS** с добавлением ИМК и НУК в концентрациях 3,0 и 5,0 мг/л, последующее культивирование на безгормональной среде **2MS б/г** в течение 42 дней при фотопериоде 16/8 ч.

2MS: KH_2PO_4 по MS, ½ NH_4NO_3 и ½ KNO_3 по MS, содержание CaCl_2 и $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ по MS увеличено в 2 раза, микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины B_6 , PP – по 1 мг/л, витамин C – 2 мг/л, мезоинозит – 100 мг/л, сахароза – 30 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред:

2MS-3И (добавление ИМК в концентрации 3,0 мг/л); **2MS-5И** (5,0 мг/л ИМК); **2MS-3Н** (добавление нафтилуксусной кислоты (НУК) в концентрации 3,0 мг/л); **2MS-5Н** (5,0 мг/л НУК); **2MS 6/г** – безгормональная среда.

Схема VIa. Двухэтапное укоренение. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной **среды ¼ Г**, дополненной высокими концентрациями ИМК, последующее культивирование на безгормональной среде того же минерального состава с добавлением вермикулита (**¼ Ув**) и без вермикулита (**¼ У**) в течение 42 дней при фотопериоде 16/8 ч.

¼ Г: ¼ макросоли по MS, ½ микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: **¼ ГЗ** (добавление ИМК в концентрации 3 мг/л); **¼ Г5** (5 мг/л ИМК).

¼ У: ¼ макросоли по MS, ½ микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение среды: **¼ Ув** (с добавлением вермикулита).

Схема VIб. Двухэтапное укоренение. Темновая фаза 7 дней для инициации корнеобразования с использованием агаризованной **среды ½ Г**, дополненной высокими концентрациями ИМК, последующее культивирование на безгормональной среде того же минерального состава с добавлением вермикулита (**½ Ув**) и без вермикулита (**½ У**) в течение 42 дней при фотопериоде 16/8 ч.

½ Г: ½ макро- и микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение сред: **½ ГЗ** (добавление ИМК в концентрации 3 мг/л); **½ Г5** (5 мг/л ИМК).

½ У: ½ макро- и микросоли по MS, FeNa-EDTA по MS, витамины по MS, сахароза – 20 г/л, агар – 5,8 г/л, pH 5,8. Обозначение среды: **½ Ув** (с добавлением вермикулита).

Растения-регенеранты на этапе ризогенеза *in vitro* культивировали в банках объемом 450 мл с объемом питательной среды 80 мл без вермикулита и с вермикулитом (питательная среда : вермикулит = 1 : 1,25 (v/v)).

Адаптацию растений-регенерантов проводили в мини-парниках размером 435 × 215 × 130 мм. Субстраты: торф «Двина» : агроперлит = 1 : 1 (стерильный); вермикулит : агроперлит = 1 : 1 (стерильный). Стерильность субстратов достигалась путем их прокаливанию в сушильном шкафу при 160 °C в течение 2,5 ч.

На этапе ризогенеза *in vitro* и адаптации *ex vitro* освещение (лампы NARVA LT, 36 W) – 2,5–3,0 тыс. лк, температура – 20–22 °C и фотопериод – 16/8 ч.

Статистическую обработку проводили с помощью *Statistica 10.0*, используя ANOVA, двухфакторный анализ, критерий Дункана при $p < 0,05$ для сравнения средних величин ($n = 3$), критерий Тьюки для неравных n .

Результаты и их обсуждение. На этапе ризогенеза *in vitro* растений-регенерантов сортов груши изучали 6 схем укоренения.

Схема I. В результате проведения двухфакторного дисперсионного анализа установлено влияние с высоким уровнем значимости ($p < 0,0001$) как сортовых особенностей, так и питательной среды и совокупности этих факторов на выход укорененных растений-регенерантов груши при данной схеме укоренения. Анализ средних значений укореняемости микропобегов по фактору А (сорт) без учета питательной среды показал, что сорта Купала и Спакуса при данной схеме укоренения имеют высокую ризогенную активность: 80,2 и 82,5 % соответственно. В группы средней ризогенной активности попали сорта Просто Мария (39,6 %) и Ясачка (42,1 %) и низкой ризогенной активности – Кудесница (15,4 %), Талгарская красавица (11,3 %), Белорусская поздняя (7,4 %) (рис. 1, а). У сортов со средней и высокой ризогенной активностью образование корней наблюдали даже на среде без добавления ИМК: 17 % (Просто Мария), 37 % (Ясачка), 60 % (Спакуса) и 67 % (Купала). У сорта Просто Мария добавление ИМК в концентрации от 0,1 до 1,0 мг/л увеличивало выход укорененных растений в 1,2–4,3 раза. У сорта Ясачка доля укорененных растений увеличилась в 1,1–1,7 раза при использовании ИМК в концентрациях от 0,5 до 1,0 мг/л. У сортов Купала и Спакуса максимальное количество укорененных растений-регенерантов – 97 и 100 % соответственно – получено на средах с добавлением ИМК в концентрации 1,0 мг/л. Однако применение ИМК в концентрации больше 0,2 мг/л вело к образованию мягкого каллуса на корнях и у основания побегов груши в процессе ризогенеза. Концентрация ИМК 0,2 мг/л

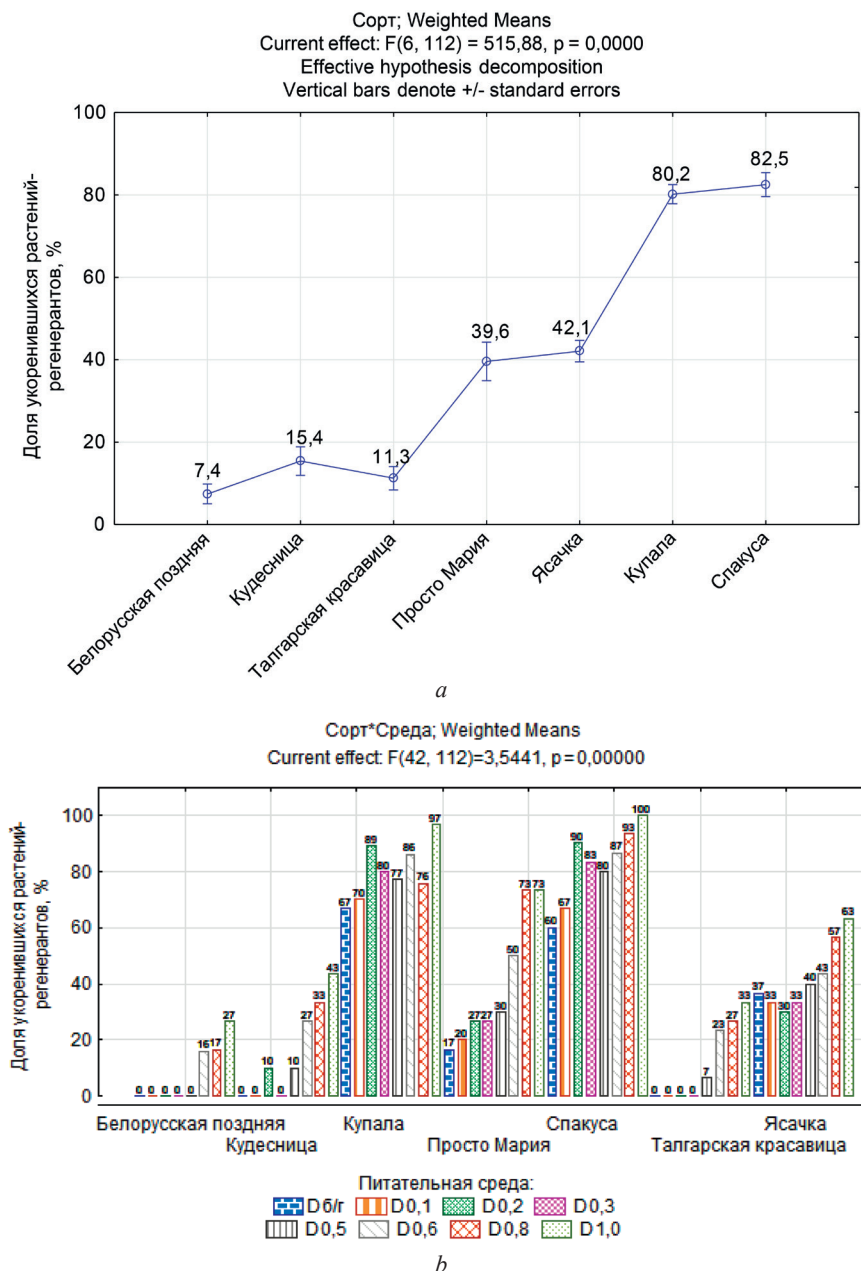
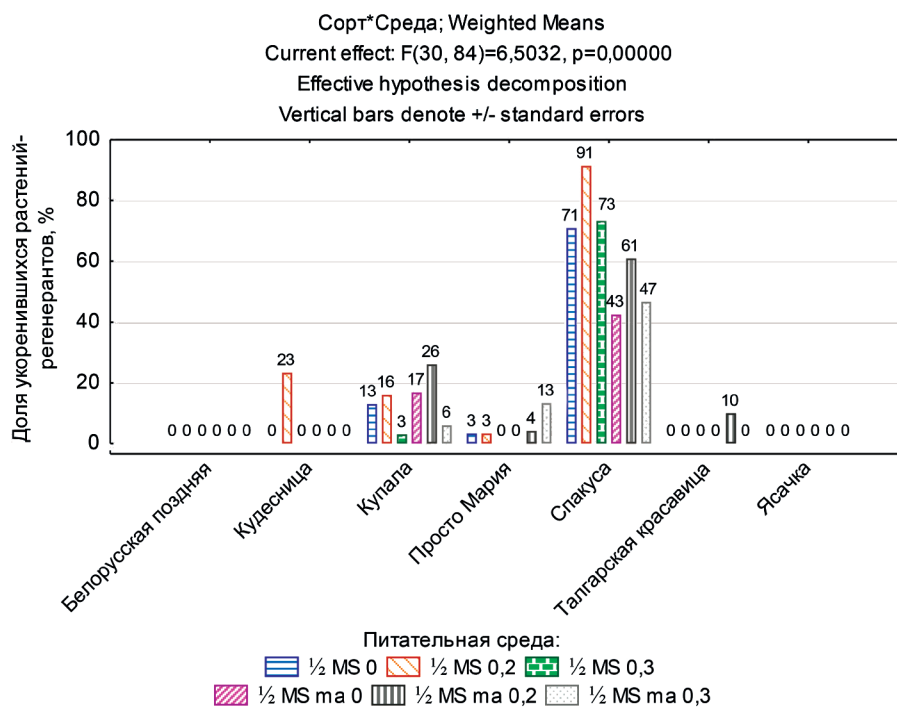


Рис. 1. Укореняемость *in vitro* микропобегов груши на среде D (схема I): *a* – по фактору «сорт» (без учета питательной среды); *b* – по совокупности факторов «сорт» и «питательная среда»

Fig. 1. *In vitro* rooting of pear microshoots on medium D (scheme I): *a* – by cultivar factor without taking into account the nutrient medium; *b* – by the combined effects of the cultivar and nutrient medium factors

обеспечивает выход 89 и 90 % укорененных растений сорта Купала и Спакуса без образования каллуса, поэтому именно концентрации ИМК 0,2 мг/л надо отдавать предпочтение при одно-этапном укоренении сортов Купала и Спакуса (рис. 1, *b*).

Схема II. Статистическая обработка данных показала влияние с высоким уровнем значимости ($p < 0,0001$) сортовых особенностей, питательной среды и совокупности этих факторов на количество укорененных растений-регенерантов груши при данной схеме укоренения. Высокая ризогенная активность отмечена только у сорта Спакуса: максимальное количество укорененных растений-регенерантов (91 %) было на среде $\frac{1}{2}$ MS 0,2. У остальных сортов процесс корнеобразования либо отсутствовал (Белорусская поздняя, Ясачка), либо был минимальным: не превысил 10 % у сорта Талгарская красавица, 13 % у сорта Просто Мария, 23 % у сорта Кудесница и 26 % у сорта Купала (рис. 2).

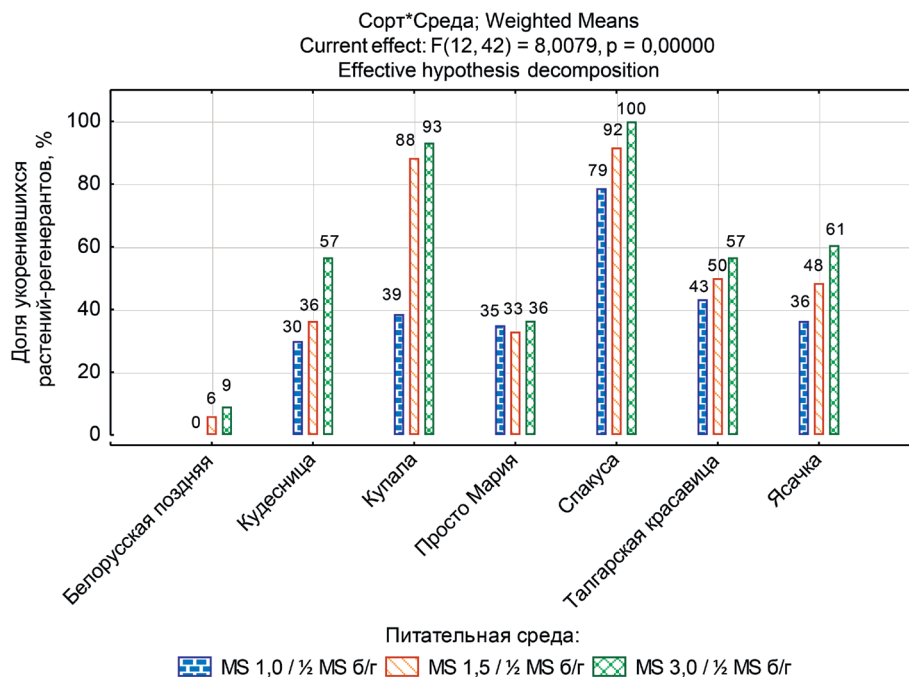
Рис. 2. Результативность ризогенеза *in vitro* микропобегов груши по схеме IIFig. 2. Efficiency of *in vitro* rhizogenesis of pear microshoots according to scheme II

Таким образом, при одноэтапном укоренении сортов груши использование среды DKW (схема I) более эффективно, чем применение среды MS (схема II). Добавление ИМК в концентрации 1,0 мг/л позволяет получить 27 % укорененных растений сорта Белорусская поздняя, 43 % – Кудесница, 73 % – Просто Мария, 33 % – Талгарская красавица и 63 % – Ясачка. Для сортов Купала и Спакуса целесообразно использование ИМК в более низкой концентрации (0,2 мг/л), что обеспечивает высокую долю укорененных растений-регенерантов (89 и 90 % соответственно) без образования мягкого каллуса у основания побегов (см. рис. 1, б). В [19] также отмечается, что увеличение концентрации с 0,2 до 1,0 мг/л НУК при укоренении сорта *P. communis* Passe-Crassane стимулировало каллусогенез и ухудшало качество побегов.

Схема III. Статистическая обработка данных, полученных при этой схеме укоренения, также показала влияние с высоким уровнем значимости ($p < 0,0001$) сортовых особенностей, питательной среды и совокупности этих факторов на количество укорененных растений-регенерантов груши. Максимальный выход укорененных растений у всех сортов получен при добавлении в темновой фазе высокой концентрации ИМК – 3 мг/л. Высокую ризогенную активность при данной схеме укоренения проявили сорта Купала и Спакуса. Доля укорененных растений при концентрации ИМК 3 мг/л составила 93 % у сорта Купала и 100 % у сорта Спакуса. У других сортов ризогенная активность даже при максимальной концентрации ИМК (3,0 мг/л) была значительно ниже: 61 % у сорта Ясачка, 57 % у сортов Кудесница и Талгарская красавица, 36 % у сорта Просто Мария. Сорт Белорусская поздняя проявил самую низкую ризогенную активность (9 %) (рис. 3).

Образование мягкого рыхлого каллуса у основания побегов отмечено при всех концентрациях ИМК у сортов Кудесница, Талгарская красавица и Просто Мария.

Схема IV. При данной схеме укоренения только у сортов Спакуса и Талгарская красавица удалось получить более 50 % укорененных растений, у остальных сортов укореняемость составила 21,4–38,1 % (Белорусская поздняя), 39,5–43,5 % (Кудесница), 43,3–53,2 % (Купала), 6,25–24,1 % (Просто Мария). Самая высокая ризогенная активность была у сорта Спакуса – 70,6 % (без учета питательной среды) (табл. 1). У всех сортов наблюдали образование мягкого рыхлого каллуса у основания побегов, который легко убирается руками при отмывании корней водой от остатков агара.

Рис. 3. Результативность ризогенеза *in vitro* микропобегов груши по схеме IIIFig. 3. Efficiency of *in vitro* rhizogenesis of pear microshoots according to scheme IIIТаблица 1. Результативность укоренения *in vitro* растений-регенерантов сортов груши (схема IV)Table 1. Efficiency of *in vitro* rooting of pear cultivars regenerated plants (scheme IV)

Сорт (фактор А)	Питательная среда (фактор В)	Доля укоренившихся растений-регенерантов, %
<i>Влияние совокупности факторов</i>		$p < 0,05$
Белорусская поздняя	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	21,4 ± 3,6 e
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	38,1 ± 4,8 d
Кудесница	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	39,5 ± 2,6 d
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	43,5 ± 3,6 cd
Купала	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	53,2 ± 8,0 bc
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	43,3 ± 2,1 cd
Просто Мария	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	6,25 ± 3,6 f
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	24,1 ± 0,9 e
Спакуса	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	63,3 ± 3,7 b
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	78,0 ± 4,9 a
Талгарская красавица	MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г	58,4 ± 5,5 b
	MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г	60,7 ± 3,1 b
<i>Среднее по фактору А (сорт)</i>		
<i>Влияние фактора «сорт»</i>		$p < 0,001$
Белорусская поздняя		29,8 ± 4,6 D
Кудесница		41,5 ± 2,2 C
Купала		48,2 ± 4,3 C
Просто Мария		15,2 ± 4,3 E
Спакуса		70,6 ± 4,3 A
Талгарская красавица		59,5 ± 2,6 B
<i>Среднее по фактору В (питательная среда)</i>		
<i>Влияние фактора «питательная среда»</i>		$p < 0,01$
MS 3,0 / 1/4 DKW 6/г		40,3 ± 5,2 G
MS 5,0 / 1/4 DKW 6/г		47,9 ± 4,3 F

Примечание. Данные с одинаковыми буквами статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Дункана).
 Note. Data points marked with the same letters are not statistically different at $p < 0.05$ (Duncan criterion).

Схема V. Максимальное количество укорененных растений-регенерантов сортов Белорусская поздняя (60,6 %), Кудесница (62,2 %) и Ясачка (73,8 %) было на среде 2MS-3И / 2MS б/г. Для растений сорта Купала достоверных различий по количеству укорененных растений на средах, содержащих 3,0 и 5,0 мг/л ИМК, не было (доля укорененных растений-регенерантов – 62,7 и 65,5 % на средах 2MS-3И / 2MS б/г и 2MS-5И / 2MS б/г соответственно). Достоверных различий по числу укорененных растений на средах с различной концентрацией ИМК не было и у сорта Спакуса: доля укорененных растений-регенерантов составила 100,0 и 96,7 % на средах 2MS-3И / 2MS б/г и 2MS-5И / 2MS б/г соответственно. У сорта Просто Мария достоверных различий не было между всеми вариантами питательных сред (28,3–35,7 %). Использование НУК дало хороший выход укорененных растений только у сортов Купала (63,4 % на среде 2MS-5И / 2MS б/г), Спакуса (100 % на среде 2MS-3И / 2MS б/г) и Талгарская красавица (33,3 % на среде 2MS-3И / 2MS б/г), однако качество укорененных побегов на средах с ИМК лучше, чем при добавлении НУК. Например, среднее количество корней на растение на среде с ИМК в концентрации 3 мг/л у сортов Купала и Спакуса в 1,5–1,7 раза выше, чем на среде с НУК в той же концентрации. У сорта Талгарская красавица применение ИМК также стимулировало закладку корней лучше, чем НУК (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Результативность укоренения *in vitro* растений-регенерантов сортов груши (схема V)Table 2. Efficiency of *in vitro* rooting of pear cultivars regenerated plants (scheme V)

Сорт (фактор А)	Питательная среда (фактор В)	Доля укоренившихся растений-регенерантов, %*	Среднее количество корней, шт.**
<i>Влияние совокупности факторов</i>		$p < 0,0001$	$p < 0,0001$
Белорусская поздняя	2MS-5И / 2MS б/г	34,4 ± 2,9 j	3,9 ± 0,5 efg
	2MS-3И / 2MS б/г	60,6 ± 1,6 de	3,2 ± 0,4 fg
	2MS-5И / 2MS б/г	20,7 ± 0,7 lm	1,5***
	2MS-3И / 2MS б/г	17,4 ± 3,8 mn	4,2***
Кудесница	2MS-5И / 2MS б/г	47,2 ± 2,8 fgh	3,0 ± 0,5 fg
	2MS-3И / 2MS б/г	62,2 ± 2,2 d	2,0 ± 0,3 g
	2MS-5И / 2MS б/г	38,8 ± 1,2 hij	3,4 ± 0,3 efg
	2MS-3И / 2MS б/г	45,3 ± 2,4 ghi	2,5 ± 0,2 g
Купала	2MS-5И / 2MS б/г	65,5 ± 3,0 cd	3,5 ± 0,3 efg
	2MS-3И / 2MS б/г	62,7 ± 2,0 d	4,7 ± 0,2 def
	2MS-5И / 2MS б/г	63,4 ± 1,9 d	2,6 ± 0,3 g
	2MS-3И / 2MS б/г	51,3 ± 1,3 efg	3,1 ± 0,3 fg
Просто Мария	2MS-5И / 2MS б/г	35,7 ± 1,3 ij	2,2 ± 0,1 g
	2MS-3И / 2MS б/г	31,5 ± 4,2 jk	2,7 ± 0,03 fg
	2MS-5И / 2MS б/г	34,4 ± 3,4 j	2,0 ± 0,1 g
	2MS-3И / 2MS б/г	28,3 ± 1,5 ijk	2,6 ± 0,03 g
Спакуса	2MS-5И / 2MS б/г	96,7 ± 3,3 a	13,1 ± 0,4 a
	2MS-3И / 2MS б/г	100 ± 0 a	11,0 ± 1,1 b
	2MS-5И / 2MS б/г	78,8 ± 3,7 b	6,8 ± 0,1 c
	2MS-3И / 2MS б/г	100 ± 0 a	6,5 ± 0,4 cd
Талгарская красавица	2MS-5И / 2MS б/г	22,5 ± 4,5 klm	5,3 ± 0,3 cde
	2MS-3И / 2MS б/г	8,9 ± 4,9 n	5,0***
	2MS-5И / 2MS б/г	19,1 ± 4,8 lm	2,8***
	2MS-3И / 2MS б/г	33,3 ± 6,7 j	1,6***
Ясачка	2MS-5И / 2MS б/г	56,7 ± 5,8 def	2,9 ± 0,2 fg
	2MS-3И / 2MS б/г	73,8 ± 5,1 bc	2,0 ± 0,1 g
	2MS-5И / 2MS б/г	22,2 ± 4,0 klm	3,5 ± 0,4 efg
	2MS-3И / 2MS б/г	32,2 ± 2,9 jk	2,7 ± 0,1 fg
<i>Среднее по фактору А (сорт)</i>			
<i>Влияние фактора «сорт»</i>		$p < 0,0001$	$p < 0,0001$
Белорусская поздняя		33,3 ± 5,2 D	3,6 ± 0,3 C
Кудесница		48,4 ± 2,8 C	2,7 ± 0,2 CD
Купала		60,7 ± 1,9 B	3,5 ± 0,3 C

Окончание табл. 2

Сорт (фактор А)	Питательная среда (фактор В)	Доля укоренившихся растений-регенерантов, %*	Среднее количество корней, шт.**
Просто Мария		32,5 ± 1,5 D	2,4 ± 0,1 D
Спакуса		93,9 ± 2,9 А	9,3 ± 0,9 А
Талгарская красавица		21,0 ± 3,5 E	5,3 ± 0,3 B
Ясачка		46,2 ± 6,4 C	2,8 ± 0,2 CD
<i>Среднее по фактору В (питательная среда)</i>			
<i>Влияние фактора «питательная среда»</i>		<i>p < 0,0001</i>	–
2MS-5И/2MS бг		51,3 ± 5,2 G	4,8 ± 0,8 E
2MS-3И/2MS бг		57,1 ± 6,2 F	4,3 ± 0,8 EF
2MS-5Н/2MS бг		39,6 ± 4,9 I	3,7 ± 0,5 FG
2MS-3Н/2MS бг		44,0 ± 5,7 H	3,5 ± 0,4 G

Примечания: * – данные с одинаковыми буквами по столбцам статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Дункана); ** – данные с одинаковыми буквами по столбцам статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Тьюки для неравных n); *** – недостаточная выборка для статистической обработки.

Note: * – data with the same letters in columns are not statistically different at $p < 0.05$ (Duncan criterion); ** – data with the same letters in columns are not statistically different at $p < 0.05$ (Tukey's test for unequal n); *** – insufficient sample for statistical processing.

Следует отметить, что из семи сортов только у двух (Белорусская поздняя и Спакуса) в процессе ризогенеза отсутствовало образование мягкого рыхлого каллуса (рис. 4, а), у сорта Купала образование каллуса было минимальным, а вот у сорта Кудесница у основания стебля образовывался мягкий каллус большого размера (рис. 4, б).

Таким образом, данная схема укоренения показала, что в качестве стимулятора корнеобразования лучше применять ИМК, а не НУК. Анализ средних значений укореняемости микропобегов груши по фактору В (питательная среда) без учета сорта показал достоверную разницу по количеству укорененных растений-регенерантов на питательных средах с добавлением ИМК в темновой фазе укоренения (51,3 и 57,1 % на средах 2MS-5И / 2MS б/г и 2MS-3И / 2MS б/г соответственно), по сравнению со средами с добавлением НУК (39,6 и 44,0 % на средах 2MS-5Н / 2MS б/г и 2MS-3Н / 2MS б/г соответственно). Укореняемость растений-регенерантов груши сильно варьировала по сортам. Анализ данных без учета питательной среды показал, что максимальную ризогенную активность при данной схеме укоренения проявили сорта Спакуса (укореняемость в среднем составила 93,9 %) и Купала (в среднем 60,7 %). Низкая ризогенная активность отмечена у сорта Талгарская красавица (в среднем 21,0 %) (табл. 2).

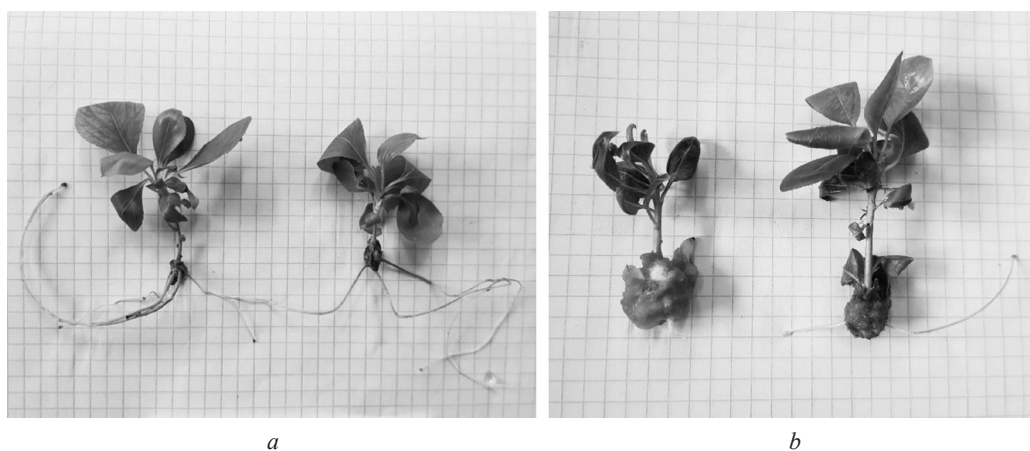


Рис. 4. Ризогенез растений-регенерантов сортов груши на средах 2MS-5И / 2MS б/г (слева) и 2MS-3И / 2MS б/г (справа): а – Белорусская поздняя; б – Кудесница

Fig. 4. Rhizogenesis of pear cultivars regenerated plants on media 2MS-5И / 2MS hormone-free (left) and 2MS-3И / 2MS hormone-free (right): а – Belorusskaya Pozdnyaya; б – Kudesnitsa

Схемы VIa и VIб. При данных схемах укоренения максимальное количество укорененных растений-регенерантов сорта Белорусская поздняя получено на средах $\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У (76,7 %), $\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У (71,1 %), $\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У (83,3 %). У сорта Кудесница достоверных различий по выходу укорененных растений-регенерантов не было на средах $\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У (70,0 %), $\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У (66,7 %), $\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У (80,9 %), $\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У (73,3 %). Таким образом, для сортов Белорусская поздняя и Кудесница культивирование растений-регенерантов после 7-дневной темновой фазы инициации корней эффективнее проводить на безгормональной агаризованной среде без добавления вермикулита. На средах с добавлением вермикулита эффективность ризогенеза этих двух сортов была ниже в 1,4–2,0 раза (табл. 3).

Таблица 3. Результативность укоренения *in vitro* растений-регенерантов сортов груши (схема VI)
Table 3. Efficiency of *in vitro* rooting of pear cultivars regenerated plants (scheme VI)

Сорт	Питательная среда	Доля укоренившихся растений-регенерантов, %
<i>Влияние совокупности факторов</i>		$p < 0,0001$
Белорусская поздняя	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У	83,3 ± 0 abcd
	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ УВ	41,1 ± 4,8 nopqr
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У	71,1 ± 4,4 cdefgh
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ УВ	45,5 ± 4,5 jklmnopq
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У	76,7 ± 5,1 abcdef
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ УВ	56,3 ± 1,8 ghijklmn
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У	50,0 ± 5,8 jklmnop
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ УВ	43,9 ± 4,0 jklmnopq
Кудесница	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У	73,3 ± 3,3 bcdefg
	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ УВ	36,7 ± 3,3 opqr
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У	80,9 ± 5,0 abcde
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ УВ	43,3 ± 6,7 klmnopqr
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У	66,7 ± 6,7 defghi
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ УВ	46,7 ± 3,3 jklmnopq
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У	70,0 ± 0 cdefgh
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ УВ	42,1 ± 4,1 mnopqr
Купала	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У	67,0 ± 4,0 defghi
	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ УВ	41,8 ± 2,7 mnopqr
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У	63,3 ± 3,3 efghij
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ УВ	50,0 ± 5,8 jklmnop
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У	76,6 ± 8,8 abcdef
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ УВ	70,9 ± 0,9 cdefgh
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У	86,9 ± 2,6 abc
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ УВ	86,7 ± 6,7 abc
Просто Мария	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У	26,7 ± 6,7 rs
	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ УВ	39,9 ± 5,1 nopqr
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У	40,0 ± 0 nopqr
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ УВ	53,3 ± 3,3 hijklmno
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У	40,0 ± 11,5 nopqr
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ УВ	60,7 ± 7,7 fghijkl
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У	44,4 ± 5,6 klmnopqr
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ УВ	56,0 ± 4,0 ghijklmn
Спакуса	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ У	55,6 ± 5,6 ghijklmn
	$\frac{1}{4}$ Г5 – $\frac{1}{4}$ УВ	87,2 ± 8,9 abc
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ У	60,3 ± 3,2 fghijklm
	$\frac{1}{4}$ Г3 – $\frac{1}{4}$ УВ	93,3 ± 3,3 a
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ У	90,5 ± 4,8 ab
	$\frac{1}{2}$ Г5 – $\frac{1}{2}$ УВ	87,3 ± 6,4 abc
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ У	86,7 ± 6,7 abc
	$\frac{1}{2}$ Г3 – $\frac{1}{2}$ УВ	93,9 ± 6,1 a

Окончание табл. 3

Сорт	Питательная среда	Доля укоренившихся растений-регенерантов, %
Талгарская красавица	¼ Г5 – ¼ У	39,7 ± 3,2 nopqr
	¼ Г5 – ¼ Ув	42,1 ± 4,1 lmnopqr
	¼ Г3 – ¼ У	50,0 ± 0 ijklmnop
	¼ Г3 – ¼ Ув	36,7 ± 3,3 opqr
	½ Г5 – ½ У	33,3 ± 6,7 pqr
	½ Г5 – ½ Ув	40,0 ± 0 nopqr
	½ Г3 – ½ У	16,7 ± 8,3 s
Ясачка	¼ Г5 – ¼ У	63,3 ± 8,8 efg hij
	¼ Г5 – ¼ Ув	61,9 ± 4,8 fghijk
	¼ Г3 – ¼ У	76,7 ± 8,8 abcdef
	¼ Г3 – ¼ Ув	73,0 ± 8,5 bcdefg
	½ Г5 – ½ У	72,2 ± 4,0 bcdefg
	½ Г5 – ½ Ув	73,3 ± 6,7 bcdefg
	½ Г3 – ½ У	60,0 ± 5,8 fghijklm
	½ Г3 – ½ Ув	82,6 ± 3,7 abcd
<i>Среднее по фактору А (сорт)</i>		
<i>Влияние фактора «сорт»</i>		<i>p < 0,0001</i>
Белорусская поздняя		58,5 ± 3,4 С
Кудесница		57,5 ± 3,6 С
Купала		67,9 ± 3,5 В
Просто Мария		45,1 ± 2,8 D
Спакуса		81,8 ± 3,4 А
Талгарская красавица		36,1 ± 2,4 E
Ясачка		70,4 ± 2,5 В
<i>Среднее по фактору В (питательная среда)</i>		
<i>Влияние фактора «питательная среда»</i>		<i>p < 0,0001</i>
	¼ Г5 – ¼ У	58,4 ± 4,4 GH
	¼ Г5 – ¼ Ув	50,1 ± 4,1 I
	¼ Г3 – ¼ У	63,2 ± 3,3 FG
	¼ Г3 – ¼ Ув	56,4 ± 4,5 H
	½ Г5 – ½ У	65,1 ± 4,9 F
	½ Г5 – ½ Ув	62,2 ± 3,7 FGH
	½ Г3 – ½ У	59,2 ± 5,5 FGH
	½ Г3 – ½ Ув	62,2 ± 5,5 FGH

Примечания. Данные с одинаковыми буквами статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Дункана).

Notes. Data with the same letters are not statistically different at $p < 0.05$ (Duncan criterion).

Сорта Спакуса и Купала проявили хорошую ризогенную активность (86,7–93,9 % и 76,6–86,9 % соответственно) на питательных средах с половинным содержанием макро- и микросолей по MS с двумя концентрациями ИМК (3,0 и 5,0 мг/л) в темновой фазе с последующим культивированием на безгормональной среде с половинным содержанием макро- и микросолей по MS без вермикулита или с вермикулитом. У сорта Просто Мария максимальное количество укорененных растений-регенерантов было получено на средах ½ Г3 – ½ Ув (56,0 %) и ½ Г5 – ½ Ув (60,7 %), у сорта Ясачка – на среде ½ Г3 – ½ Ув (82,6 %). Следует отметить, что у сорта Ясачка ризогенная активность на всех остальных вариантах сред была тоже высокая: не ниже 60,0 %. У сорта Талгарская красавица максимальное количество укорененных растений-регенерантов было получено на среде ¼ Г3 – ¼ У (50 %), все остальные варианты сред были менее эффективны для ризогенеза: 16,7–42,1 % (табл. 3). У всех сортов на каждом варианте питательных сред в процессе ризогенеза образовывался мягкий каллус.

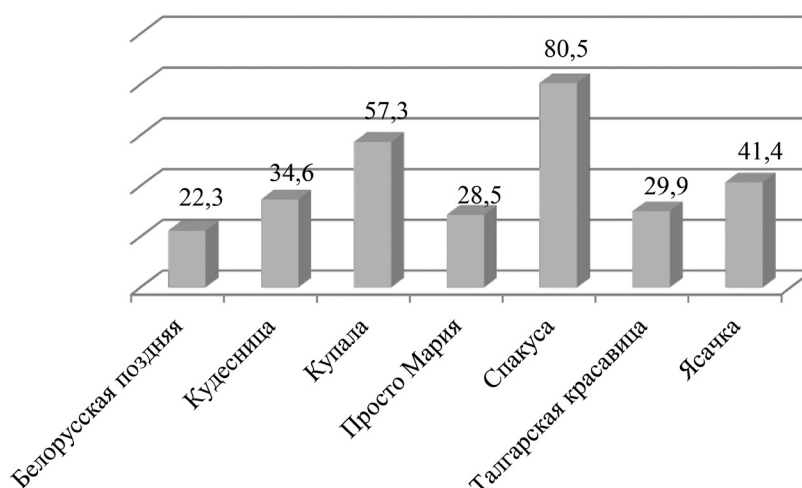


Рис. 5. Процент укоренившихся растений-регенерантов сортов груши (среднее значение по сорту по схемам укоренения I–VI без учета питательной среды)

Fig. 5. The percentage of rooted regenerated plants of pear cultivars (average value per cultivar according to rooting schemes I–VI, excluding the nutrient medium)

Анализ средних значений укореняемости микропобегов груши по фактору В (питательная среда) без учета сорта показал отсутствие достоверной разницы по количеству укорененных растений-регенерантов на питательных средах с $\frac{1}{2}$ макро- и микросолей по MS с двумя концентрациями ИМК (3,0 и 5,0 мг/л) в темновой фазе с последующим культивированием на безгормональной среде с $\frac{1}{2}$ макро- и микросолей по MS без вермикулита или с вермикулитом. Только на средах с $\frac{1}{4}$ макро- и $\frac{1}{2}$ микросолей по MS с двумя концентрациями ИМК (3,0 и 5,0 мг/л) в темновой фазе и последующее культивирование на безгормональной среде с $\frac{1}{4}$ макро- и $\frac{1}{2}$ микросолей по MS без вермикулита было достоверно эффективнее, чем с вермикулитом. Высокую ризогенную активность при схеме укоренения VI проявили сорта Спакуса – 81,8 %, Ясачка – 70,4 %, Купала – 67,9 % (без учета питательной среды), низкая ризогенная активность отмечена у сорта Талгарская красавица – 36,1 % (без учета питательной среды) (табл. 3).

Таким образом, эффективность укоренения в культуре *in vitro* растений-регенерантов сортов груши зависит от сортовых особенностей, питательной среды для укоренения, наличия темновой фазы инициации корней. Все изученные сорта груши отличаются по своей ризогенной активности: высокая – Спакуса, Купала; средняя – Ясачка, Кудесница, Талгарская красавица, Просто Мария; низкая – Белорусская поздняя (рис. 5).

Адаптация укорененных *in vitro* растений-регенерантов в условиях *ex vitro*. Лучший результат по адаптации в условиях *ex vitro* растений-регенерантов сортов Белорусская поздняя (82,8 %), Просто Мария (90,7 %), Талгарская красавица (83,8 %) и Ясачка (79,8 %) получен на стерильном субстрате торф : агроперлит в соотношении 1 : 1. У сортов Кудесница, Купала и Спакуса достоверных различий по количеству адаптированных растений на двух типах субстрата не было (табл. 4).

Таблица 4. Результативность адаптации растений-регенерантов сортов груши в условиях *ex vitro* при использовании двух типов субстрата

Table 4. Efficiency of adaptation of pear cultivars regenerated plants under *ex vitro* conditions using two types of substrate

Сорт (фактор А)	Субстрат (фактор В)	Доля адаптированных растений-регенерантов, %
<i>Влияние совокупности факторов</i>		$p < 0,0001$
Белорусская поздняя	Торф : агроперлит	$82,8 \pm 0,5 \text{ abc}$
	Вермикулит : агроперлит	$60,3 \pm 6,6 \text{ e}$
Кудесница	Торф : агроперлит	$87,1 \pm 2,7 \text{ abc}$
	Вермикулит : агроперлит	$89,7 \pm 5,2 \text{ abc}$

Окончание табл. 4

Сорт (фактор А)	Субстрат (фактор В)	Доля адаптированных растений-регенерантов, %
Купала	Торф : агроперлит	79,2 ± 6,6 cd
	Вермикулит : агроперлит	86,0 ± 0,5 abc
Просто Мария	Торф : агроперлит	90,7 ± 4,9 abc
	Вермикулит : агроперлит	45,9 ± 2,4 f
Спакуса	Торф : агроперлит	98,1 ± 1,9 a
	Вермикулит : агроперлит	94,8 ± 2,9 ab
Талгарская красавица	Торф : агроперлит	83,8 ± 8,5 abc
	Вермикулит : агроперлит	67,8 ± 1,1 de
Ясачка	Торф : агроперлит	79,8 ± 7,7 bcd
	Вермикулит : агроперлит	55,0 ± 1,7 ef
<i>Среднее по фактору А (сорт)</i>		
<i>Влияние фактора «сорт»</i>		<i>p < 0,0001</i>
Белорусская поздняя		71,6 ± 5,8 D
Кудесница		88,4 ± 2,7 AB
Купала		82,6 ± 3,3 BC
Просто Мария		68,3 ± 10,3 D
Спакуса		96,5 ± 1,7 A
Талгарская красавица		75,8 ± 5,2 CD
Ясачка		67,4 ± 6,6 D
<i>Среднее по фактору В (субстрат)</i>		
<i>Влияние фактора «субстрат»</i>		<i>p < 0,0001</i>
Торф : агроперлит		85,9 ± 2,2 E
Вермикулит : агроперлит		71,4 ± 4,1 F

Примечания. Данные с одинаковыми буквами статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Дункана).

Note s. Data with the same letters are not statistically different at $p < 0.05$ (Duncan criterion).

Таблица 5. Результативность адаптации *ex vitro* растений-регенерантов сортов груши (стерильный субстрат – торф : агроперлит (1 : 1))

Table 5. Efficiency of *ex vitro* adaptation of pear cultivars regenerated plants (sterile substrate – peat : agropelite (1 : 1))

Сорт	Доля адаптированных растений-регенерантов, %
Белорусская поздняя	100 a
Кудесница	100 a
Купала	100 a
Просто Мария	100 a
Спакуса	100 a
Ясачка	100 a
Талгарская красавица	92,9 ± 4,13 b

Примечания. Данные с одинаковыми буквами статистически не различаются при $p < 0,05$ (критерий Дункана).

Note s. Data with the same letters are not statistically different at $p < 0.05$ (Duncan criterion).

В дальнейшей работе при адаптации *ex vitro* сортов груши использовался стерильный субстрат торф : агроперлит в соотношении 1 : 1. Статистическая обработка данных показала отсутствие влияния сортовых особенностей на адаптацию растений груши. Доля адаптированных растений составила 100 %, за исключением сорта Талгарская красавица – 92,9 % (табл. 5).

Адаптация в условиях *ex vitro* растений-регенерантов, которые не укоренились *in vitro*. Увеличить выход адаптированных растений сортов груши можно за счет посадки в субстрат не только укорененных растений-регенерантов, но и растений, которые не дали корней при культивировании на среде, содержащей ИМК. У сортов, которые проявили высокую ризогенную

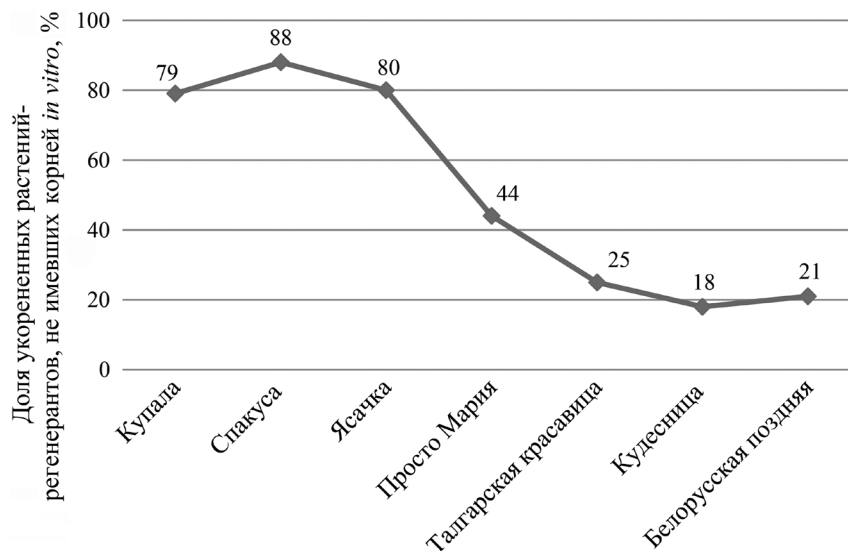


Рис. 6. Доля укорененных растений-регенерантов сортов груши, не имевших корни после этапа ризогенеза *in vitro*

Fig. 6. The percentage of rooted regenerated plants of pear cultivars that did not have roots after the *in vitro* rhizogenesis stage

активность в большинстве схем укоренения *in vitro* (Спакуса, Купала, Ясачка), 79,0–88,0 % неукорененных побегов давали корни при посадке в стерильный субстрат торф : агроперлит (1 : 1). У сорта Просто Мария данный показатель составил 44,0 %, а у других сортов не превысил 25,0 % (рис. 6).

Выводы. Эффективность укоренения в культуре *in vitro* растений-регенерантов сортов груши зависит от сортовых особенностей, питательной среды для укоренения, наличия темновой фазы инициации корней. Установлена возможность ризогенеза *in vitro* сортов груши при использовании одно- и двухэтапных (темновая фаза для инициации корней – 7 дней) схем укоренения. При одноэтапном укоренении сортов груши Белорусская поздняя, Кудесница, Купала, Просто Мария, Спакуса, Талгарская красавица, Ясачка применение среды DKW более эффективно, чем среды MS, при двухэтапном укоренении – MS. Лучшие результаты ризогенеза установлены при добавлении сахарозы в концентрации 2 %. В качестве стимулятора корнеобразования целесообразно добавлять ИМК: при одноэтапном укоренении – 0,2–1,0 мг/л, при двухэтапном – 3,0–5,0 мг/л в темновой фазе инициации корней.

Высокая ризогенная активность выявлена у сортов Спакуса, Купала, средняя – у Ясачки, Кудесницы, Талгарской красавицы, Просто Марии, низкая – у Белорусской поздней.

Одноэтапная схема укоренения с использованием агаризованной среды DKW с уменьшенной концентрацией макросолей ($\frac{1}{4}$), микросолей ($\frac{1}{2}$), железа (60 мг/л Ferric-EDDHA) и сахарозы (2 %), дополненная ИМК в концентрации 1,0 мг/л, позволяет получить 27 % укорененных растений сорта Белорусская поздняя, 43 % – Кудесница, 73 % – Просто Мария, 33 % – Талгарская красавица и 63 % – Ясачка. Для сортов Купала и Спакуса целесообразно применять ИМК в более низкой концентрации (0,2 мг/л), что обеспечивает высокую долю укорененных растений-регенерантов (89 и 90 % соответственно) без образования мягкого каллуса у основания побегов.

Из двухэтапных схем укоренения высокий процент укорененных растений-регенерантов у всех сортов (Белорусская поздняя – 83,3, Кудесница – 80,9, Купала – 86,9, Просто Мария – 60,7, Спакуса – 93,9, Талгарская красавица – 50,0, Ясачка – 82,6) получен при использовании VI схемы укоренения с применением на I этапе (темновая фаза для инициации корней – 7 дней) агаризованной среды MS с уменьшенной концентрацией макросолей ($\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$), микросолей ($\frac{1}{2}$) и сахарозы (2 %), дополненной ИМК (3 или 5 мг/л), и последующее культивирование (6 недель) на безгормональной среде того же минерального состава, что и в темновую фазу, с добавлением вермикулита или без вермикулита для развития корней. Использование вермикулита на стадии развития корней нецелесообразно только для двух сортов – Белорусская поздняя и Кудесница:

эффективность ризогенеза этих двух сортов на средах с добавлением вермикулита была ниже в 1,4–2,0 раза, чем без вермикулита. У всех сортов при данной схеме укоренения формировался мягкий каллус, который легко убирался руками.

Эффективность адаптации *ex vitro* растений-регенерантов груши составила 92,9–100,0 % при применении стерильного субстрата торф : агроперлит (1 : 1). Увеличить количество адаптированных растений сортов груши можно за счет посадки в субстрат не только укорененных растений-регенерантов, но и растений, которые не дали корней при культивировании на среде, содержащей ИМК. У сортов Спакуса, Купала, Ясачка 79,0–88,0 % неукорененных побегов давали корни при посадке в стерильный субстрат торф : агроперлит (1 : 1). У сортов Талгарская красавица, Кудесница и Белорусская поздняя данный показатель колебался от 18,0 до 25,0 %, у сорта Просто Мария – 44,0 %.

Список использованных источников

1. Bhojwani, S. S. In vitro propagation of *Pyrus pyrifolia* / S. S. Bhojwani, K. Mullins, D. Cohen // *Scientia Horticulturae*. – 1984. – Vol. 23, № 3. – P. 247–254. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(84\)90068-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(84)90068-2)
2. Singha, S. In vitro propagation of Seckel pear / S. Singha // *Nursery production of fruit plants through tissue culture: application and feasibility: proc. of the conf., Beltsville, 21–22 Apr. 1980 / U. S. Department of Agriculture, Science a. Education Administration*. – Beltsville, 1980. – P. 59–63.
3. Shen, X.-S. Propagation in vitro of pear, *Pyrus communis* L., cultivars ‘William’s Bon Chrétien’, ‘Packham’s Triumph’ and ‘Beurré Bosc’ / X.-S. Shen, M. G. Mullins // *Scientia Horticulturae*. – 1984. – Vol. 23, № 1. – P. 51–57. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(84\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0304-4238(84)90044-X)
4. Sedlak, J. Influence of growth regulators on in vitro propagation of *Pyrus communis* cv. Koporecka / J. Sedlak, F. Paprstein // *Acta Horticulturae*. – 2003. – № 616. – P. 379–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.616.57>
5. Optimization of in vitro propagation of pear (*Pyrus communis* L.) ‘Pyrodwarf®(S)’ rootstock / B. Kaviani, A. Barandan, A. Tymoszuk, D. Kulus // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13, № 1. – Art. 268. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010268>
6. In vitro propagation of *Pyrus* shoot tips / T. Hirabayashi, T. Moriguchi, I. Kozaki [et al.] // *Bulletin of the Fruit Tree Research Station. Series A*. – 1987. – № 14. – P. 9–16.
7. In vitro propagation and recovery of eight apple and two pear cultivars held in a germplasm bank / A. Lizárraga, M. Fraga, J. Ascásibar, M. L. González // *American Journal of Plant Sciences*. – 2017. – Vol. 8, № 9. – P. 2238–2254. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89150>
8. Lane, W. D. Regeneration of pear plants from shoot meristem tips / W. D. Lane // *Plant Science Letters*. – 1979. – Vol. 16, № 2–3. – P. 337–342. [https://doi.org/10.1016/0304-4211\(79\)90046-4](https://doi.org/10.1016/0304-4211(79)90046-4)
9. In vitro propagation of pear cultivars / C. Moretti, A. Scozzoli, D. Pasini, F. Paganelli // *Acta Horticulturae*. – 1991. – № 300. – P. 115–118. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.300.12>
10. Rossi, V. Propagation of *Pyrus calleryana* sel. D6 by in vitro culture / V. Rossi, G. De Paoli, P. Dal Pozzo // *Acta Horticulturae*. – 1992. – № 300. – P. 145–148. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1992.300.19>
11. Micropropagation of three *Pyrus* rootstocks / R. Bahri-Sahloul, S. Ammar, A. Msallem, R. Mtar // *Advances in Horticultural Science*. – 2005. – Vol. 19, № 1. – P. 21–28.
12. Hlaing, N. Z. Study of in vitro root induction and hardening responses of four *Pyrus spp.* / N. Z. Hlaing, F. Ming, J. Shuling // *Journal of Scientific and Innovative Research*. – 2019. – Vol. 8, № 3. – P. 87–90. <https://doi.org/10.31254/jsir.2019.8304>
13. In vitro growth responses of the ‘Pyrodwarf’ pear rootstock to cytokinin types / D. Ružić, T. Vujović, D. Nikolić, R. Cerović // *Romanian Biotechnological Letters*. – 2011. – Vol. 16, № 5. – P. 6630–6637.
14. Berardi, G. Micropropagation of *Pyrus calleryana* Dcn. from seedlings / G. Berardi, I. Rodrigo, N. Davide // *Scientia Horticulturae*. – 1993. – Vol. 53, № 1–2. – P. 157–165. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90146-H](https://doi.org/10.1016/0304-4238(93)90146-H)
15. Baviera, J. A. Commercial in vitro micropropagation of pear cv. Conference / J. A. Baviera, J. L. García, M. Ibarra // *Acta Horticulturae*. – 1989. – № 256. – P. 63–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.256.5>
16. Micropropagation and field evaluation of the pear (*Pyrus communis* L.) “IGE 2002”, a new selection of the cultivar Dr. Jules Guyot / I. Iglesias, P. Vilardell, J. Bonany [et al.] // *Journal of the American Society for Horticultural Science*. – 2004. – Vol. 129, № 3. – P. 389–393. <http://dx.doi.org/10.21273/JASHS.129.3.0389>
17. In vitro rooting of *Pyrus calleryana* / G. Berardi, D. Neri, A. Maiorino, R. Adversi // *Acta Horticulturae*. – 1992. – № 300. – P. 181–188. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.300.26>
18. Dwivedi, S. K. In vitro propagation of low-chill pear cv Gola / S. K. Dwivedi, L. D. Bist // *Indian Journal of Horticulture*. – 1999. – Vol. 56, № 3. – P. 189–193.
19. Etude comparative de l’aptitude a la micropropagation, par culture de meristems in vitro, du poirier cv. “Passe-Crassane” adulte et de poiriers juveniles issus de semis de “Passe-Crassane” / K. Al-Maarri, M. Duron, Y. Arnaud, E. Miginiac // *Comptes Rendus des Seances de l’Academie d’Agriculture de France*. – 1986. – Vol. 72, № 5. – P. 413–421.
20. Al-Maarri, K. Micropropagation of *Pyrus communis* cultivar ‘Passe Crassane’ seedlings and cultivar ‘Williams’: factors affecting root formation in vitro and ex vitro / K. Al-Maarri, Y. Arnaud, E. Miginiac // *Scientia Horticulturae*. – 1994. – Vol. 58, № 3. – P. 207–214. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90152-x](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90152-x)

21. Viseur, J. Micropropagation of pear, *Pyrus communis* L., in a double-phase culture medium / J. Viseur // *Acta Horticulturae*. – 1987. – № 212. – P. 117–124. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1987.212.19>
22. De Paoli, G. Micropropagazione delle varietà di pero / G. De Paoli // *Informatore Agrario*. – 1987. – Vol. 43, № 51. – P. 71–73.
23. Micropropagation in wild pear (*Pyrus syrica*) / R. A. Shibli, M. M. Ajlouni, A. Jaradat [et al.] // *Scientia Horticulturae*. – 1997. – Vol. 68, № 1–4. – P. 237–242. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00972-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00972-7)
24. Cosac, A. C. In vitro propagation of some pear cultivars / A. C. Cosac, L. B. Fräsin, M. Isac // *Acta Horticulturae*. – 2008. – № 800. – P. 447–452. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.800.56>
25. Микрোকлональное размножение груши (*Pyrus Communis* L.) *in vitro* / И. В. Бартиш, С. М. Меркулов, В. И. Корховой, В. П. Копань // *Физиология и биохимия культурных растений*. – 1994. – Т. 26, № 1. – С. 84–90.
26. Stimart, D. P. In vitro shoot proliferation of *Pyrus calleryana* from vegetative buds / D. P. Stimart, J. F. Harbage // *HortScience*. – 1989. – Vol. 24, № 2. – P. 298–299. <https://doi.org/10.21273/hortsci.24.2.298>
27. Reed, B. M. Screening *Pyrus* germplasm for in vitro rooting response / B. M. Reed // *HortScience*. – 1995. – Vol. 30, № 6. – P. 1292–1294. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.6.1292>

References

1. Bhojwani S. S., Mullins K., Cohen D. In vitro propagation of *Pyrus pyrifolia*. *Scientia Horticulturae*, 1984, vol. 23, no. 3, pp. 247–254. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(84\)90068-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(84)90068-2)
2. Singha S. In vitro propagation of Seckel pear. *Nursery production of fruit plants through tissue culture: application and feasibility: proceedings of the conference, Beltsville, 21–22 April 1980*. Beltsville, 1980, pp. 59–63.
3. Shen X.-S., Mullins M. G. Propagation in vitro of pear, *Pyrus communis* L., cultivars ‘William’s Bon Chrétien’, ‘Packham’s Triumph’ and ‘Beurré Bosc’. *Scientia Horticulturae*, 1984, vol. 23, no. 1, pp. 51–57. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(84\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0304-4238(84)90044-X)
4. Sedlak J., Paprstein F. Influence of growth regulators on in vitro propagation of *Pyrus communis* cv. Koporecka. *Acta Horticulturae*, 2003, no. 616, pp. 379–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.616.57>
5. Kaviani B., Barandan A., Tymoszuk A., Kulus D. Optimization of in vitro propagation of pear (*Pyrus communis* L.) ‘Pyrodwarf®(S)’ rootstock. *Agronomy*, 2023, vol. 13, no. 1, art. 268. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010268>
6. Hirabayashi T., Moriguchi T., Kozaki I., Yamamoto Y., Matsuzaki S. In vitro propagation of *Pyrus* shoot tips. *Bulletin of the Fruit Tree Research Station. Series A*, 1987, no. 14, pp. 9–16.
7. Lizárraga A., Fraga M., Ascasiábar J., González M. L. In vitro propagation and recovery of eight apple and two pear cultivars held in a germplasm bank. *American Journal of Plant Sciences*, 2017, vol. 8, no. 9, pp. 2238–2254. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89150>
8. Lane W. D. Regeneration of pear plants from shoot meristem tips. *Plant Science Letters*, 1979, vol. 16, no. 2–3, pp. 337–342. [https://doi.org/10.1016/0304-4211\(79\)90046-4](https://doi.org/10.1016/0304-4211(79)90046-4)
9. Moretti C., Scozzoli A., Pasini D., Paganelli F. In vitro propagation of pear cultivars. *Acta Horticulturae*, 1991, no. 300, pp. 115–118. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.300.12>
10. Rossi V., De Paoli G., Dal Pozzo P. Propagation of *Pyrus calleryana* sel. D6 by in vitro culture. *Acta Horticulturae*, 1992, no. 300, pp. 145–148. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1992.300.19>
11. Bahri-Sahloul R., Ammar S., Msallem A., Mtar R. Micropropagation of three *Pyrus* rootstocks. *Advances in Horticultural Science*, 2005, vol. 19, no. 1, pp. 21–28.
12. Hlaing N. Z., Ming F., Shuling J. Study of *in vitro* root induction and hardening responses of four *Pyrus* spp. *Journal of Scientific and Innovative Research*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 87–90. <https://doi.org/10.31254/jsir.2019.8304>
13. Ružić D., Vujović T., Nikolić D., Cerović R. In vitro growth responses of the ‘Pyrodwarf’ pear rootstock to cytokinin types. *Romanian Biotechnological Letters*, 2011, vol. 16, no. 5, pp. 6630–6637.
14. Berardi G., Rodrigo I., Davide N. Micropropagation of *Pyrus calleryana* Dcn. from seedlings. *Scientia Horticulturae*, 1993, vol. 53, no. 1–2, pp. 157–165. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90146-H](https://doi.org/10.1016/0304-4238(93)90146-H)
15. Baviera J. A., García J. L., Ibarra M. Commercial in vitro micropropagation of pear cv. Conference. *Acta Horticulturae*, 1989, no. 256, pp. 63–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.256.5>
16. Iglesias I., Vilardell P., Bonany J., Claveria E., Dolcet-Sanjuan R. Micropropagation and field evaluation of the pear (*Pyrus communis* L.) “IGE 2002”, a new selection of the cultivar Dr. Jules Guyot. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2004, vol. 129, no. 3, pp. 389–393. <http://dx.doi.org/10.21273/JASHS.129.3.0389>
17. Berardi G., Neri D., Maiorino A., Adversari R. In vitro rooting of *Pyrus calleryana*. *Acta Horticulturae*, 1992, no. 300, pp. 181–188. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.300.26>
18. Dwivedi S. K., Bist L. D. In vitro propagation of low-chill pear cv Gola. *Indian Journal of Horticulture*, 1999, vol. 56, no. 3, pp. 189–193.
19. Al-Maarri K., Duron M., Arnaud Y., Miginiac E. Etude comparative de l’aptitude a la micropropagation, par culture de meristems in vitro, du poirier cv. “Passe-Crassane” adulte et de poiriers juveniles issus de semis de “Passe-Crassane”. *Comptes Rendus des Seances de l’Academie d’Agriculture de France*, 1986, vol. 72, no. 5, pp. 413–421 (in French).
20. Al-Maarri K., Arnaud Y., Miginiac E. Micropropagation of *Pyrus communis* cultivar ‘Passe Crassane’ seedlings and cultivar ‘Williams’: factors affecting root formation in vitro and ex vitro. *Scientia Horticulturae*, 1994, vol. 58, no. 3, pp. 207–214. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90152-x](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90152-x)
21. Viseur J. Micropropagation of pear, *Pyrus communis* L., in a double-phase culture medium. *Acta Horticulturae*, 1987, no. 212, pp. 117–124. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1987.212.19>

22. De Paoli G. Micropropagazione delle varietà di pero. *Informatore Agrario*, 1987, vol. 43, no. 51, pp. 71–73 (in Italian).
23. Shibli R. A., Ajlouni M. M., Jaradat A., Aljanabi S., Shatnawi M. Micropropagation in wild pear (*Pyrus syrica*). *Scientia Horticulturae*, 1997, vol. 68, no. 1–4, pp. 237–242. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00972-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00972-7)
24. Cosac, A. C., Fräsin L. B., Isac M. In vitro propagation of some pear cultivars. *Acta Horticulturae*, 2008, vol. 800, pp. 447–452. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.800.56>
25. Bartish I. V., Merkulov S. M., Korkhovoy V. I., Kopan V. P. Microclonal propagation of some pear (*Pyrus Communis* L.) in vitro. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rastenii = Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*, 1994, vol. 26, no. 1, pp. 84–90 (in Russian).
26. Stimart D. P., Harbage J. F. In vitro shoot proliferation of *Pyrus calleryana* from vegetative buds. *HortScience*, 1989, vol. 24, no. 2, pp. 298–299. <https://doi.org/10.21273/hortsci.24.2.298>
27. Reed B. M. Screening *Pyrus* germplasm for in vitro rooting response. *HortScience*, 1995, vol. 30, no. 6, pp. 1292–1294. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.6.1292>

Информация об авторах

Колбанова Елена Вячеславовна – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией диагностики отдела биотехнологии, Институт плодородства, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ковалева, 2, Самохваловичи, 223013, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: el.kolbanova@mail.ru

Кухарчик Наталья Валерьевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий отделом биотехнологии, Институт плодородства, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ковалева, 2, 223013, Самохваловичи, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: nkykhartchik@gmail.com

Божидай Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела биотехнологии, доцент, Институт плодородства, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ковалева, 2, 223013, Самохваловичи, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: tanya_bozhidaj@mail.ru

Information about the authors

Elena V. Kolbanova – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Head of Diagnostics Laboratory of Biotechnology Department, Institute for Fruit Growing, National Academy of Sciences of Belarus (2, Kovalyov St., 223013, Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: el.kolbanova@mail.ru

Natallia V. Kukharchyk – Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Head of Biotechnology Department, Institute for Fruit Growing, National Academy of Sciences of Belarus (2, Kovalyov St., 223013, Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: nkykhartchik@gmail.com

Tatsiana N. Bazhydai – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher of Biotechnology Department, National Academy of Sciences of Belarus (2, Kovalyov St., 223013, Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: tanya_bozhidaj@mail.ru

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 502.521:504.5+581.192.6(470.325)

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140>

Поступила в редакцию 18.08.2025

Received 18.08.2025

С. В. Лукин^{1,2}, С. Б. Говоркова³¹Белгородский филиал ФГБУ «Агрохимическая служба России», Белгород, Российская Федерация²Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Российская Федерация³Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова,
Москва, Российская Федерация

РАДИОНУКЛИДЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ РОССИИ: МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА (БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Аннотация. Исследование посвящено оценке уровней содержания тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка, а также удельной активности естественных и искусственных радионуклидов в выщелоченных, типичных и обыкновенных черноземах и сельскохозяйственных культурах Белгородской области. Установлено, что диапазон варьирования в изучаемых почвах удельной активности калия-40 составляет 460–714; тория-232 – 30,4–59,7; радия-226 – 11,3–28,5 Бк/кг. В 2023–2024 гг. максимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах не превышал 43,8 и 5,0 Бк/кг соответственно. Концентрации в почвах кислоторастворимых форм цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути изменялись в интервалах 23,2–52,5; 7,7–14,2; 3,15–7,13; 0,15–0,41; 0,015–0,035 мг/кг соответственно. В черноземах обыкновенных средняя удельная активность тория-232, а также концентрации кислоторастворимых форм цинка, мышьяка и кадмия были существенно выше, чем в черноземах выщелоченных, что обусловлено более легким гранулометрическим составом последних. Содержание подвижных форм ТМ по подтипам черноземов существенно не отличалось и варьировало в пределах: цинк – 0,23–0,70; свинец – 0,28–0,73; кадмий – 0,02–0,08 мг/кг. Превышений ориентировочно допустимых и предельно допустимых концентраций анализируемых элементов в почвах не выявлено. В исследованных сельскохозяйственных растениях удельная активность радионуклидов, а также концентрации ТМ и мышьяка были ниже предельно допустимых значений, регламентированных для пищевой и кормовой продукции.

Ключевые слова: удельная активность, чернозем, цинк, свинец, кадмий, ртуть, озимая пшеница, соя, кукуруза, подсолнечник

Для цитирования: Лукин, С. В. Радионуклиды и тяжелые металлы в агроэко системах Центрального Черноземья России: мониторинг и оценка (Белгородская область) / С. В. Лукин, С. Б. Говоркова *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 128–140 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140>

Sergei V. Lukin^{1,2}, Svetlana B. Govorkova³¹Belgorod Branch FSBI "Agrochemical Service of Russia", Belgorod, Russian Federation²Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation³Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Moscow, Russian Federation

RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS IN AGROECOSYSTEMS OF THE CENTRAL BLACK EARTH REGION OF RUSSIA: MONITORING AND ASSESSMENT (BELGOROD REGION)

Abstract. The purpose of the study was to conduct an agroecological assessment of the content of heavy metals and arsenic, as well as the specific activity of natural and artificial radionuclides in leached, typical, ordinary chernozems and plant products in the Belgorod region. In the course of research, it was found that the variation in the studied soils of the specific activity of potassium-40 is 460–714, thorium-232 – 30.4–59.7, radium-226 – 11.3–28.5 Bq/kg. In 2023–2024, the maximum limits of variation of the specific activity of cesium-137 and strontium-90 in soils did not exceed 43.8 and 5.0 Bq/kg, respectively. The concentration in soils of acid-soluble forms of zinc, lead, arsenic, cadmium, and mercury varied in the intervals of 23.2–52.5, 7.7–14.2, 3.15–7.13, 0.15–0.41, 0.015–0.035 mg/kg, respectively. In common chernozems, the average specific activity of thorium-232, as well as the concentration of acid-soluble forms of zinc, arsenic and cadmium, was significantly higher than in leached chernozems, which is due to the lighter particle size distribution of the latter. The content of mobile forms of heavy metals by subtypes of chernozems did not differ significantly and varied within: zinc – 0.23–0.70, lead – 0.28–0.73, cadmium – 0.02–0.08 mg/kg. No excess of the APC and MPC of the studied elements in soils was detected. In the studied agricultural plants, the specific activity of cesium-137, strontium-90, as well as the content of zinc, lead, arsenic, cadmium, and mercury were below the maximum permissible values regulated for food and feed products.

Keywords: specific activity, chernozem, zinc, lead, cadmium, mercury, winter wheat, soybean, corn, sunflower

For citation: Lukin S. V., Govorkova S. B. Radionuclides and heavy metals in agroecosystems of the Central Black Earth Region of Russia: monitoring and assessment (Belgorod region). *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 128–140 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140>

Введение. Одними из опаснейших техногенных загрязнителей агроэкосистем являются широко применяемые в промышленности тяжелые металлы (ТМ) и используемые в атомной энергетике искусственные радионуклиды (ИРН) [1, 2].

Основными источниками поступления ТМ в агроэкосистемы являются предприятия горнодобывающей сферы, цветной металлургии, топливно-энергетического комплекса, автотранспорт. Достаточно большое их количество может попадать в почвы при использовании высоких доз органических удобрений и особенно осадков сточных вод (ОСВ). В России минеральные удобрения с учетом относительно низких доз внесения и их химического состава не рассматриваются как важный источник загрязнения агроэкосистем ТМ [3, 4]. В некоторых зарубежных странах (Австралия, Китай и др.) кадмий, содержащийся в фосфорных удобрениях, является значимым источником загрязнения почв [5].

Искусственные радионуклиды попадают в окружающую среду в результате испытаний ядерного оружия, аварий на объектах, имеющих атомные энергетические установки. После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительная часть Центральной России подверглась радиоактивному загрязнению искусственными радионуклидами – цезием-137 ($T_{1/2} = 30,2$ года) и стронцием-90 ($T_{1/2} = 28,5$ года) [2, 6]. В наиболее пострадавшей Брянской области в 1992–1993 гг. плотность загрязнения почвы цезием-137 на отдельных территориях превышала 100 Ки/км², а на 17 тыс. га сельскохозяйственных угодий – 40 Ки/км² [7]. В Центральном Черноземье общая площадь загрязнения земель с уровнем 1–5 Ки/км² составляла в Белгородской и Липецкой областях около 162, в Воронежской – 132, в Курской – 122, в Тамбовской – 51 тыс. га [6].

Агроэкологический мониторинг на территории России осуществляется региональными филиалами ФГБУ «Агрохимическая служба России». При его проведении наибольшее внимание уделяется изучению содержания в компонентах агроэкосистем таких ТМ, как кадмий (Cd), ртуть (Hg), свинец (Pb), цинк (Zn), поскольку они по степени токсичности относятся к первому классу (высокоопасные вещества). К этому же классу токсичности относится и металлоид мышьяк (As)¹ [1].

Несмотря на то что с момента чернобыльской катастрофы большая часть ИРН уже распалась, определение их удельной активности в почвах и растениях является важной составной частью агроэкологического мониторинга. Кроме того, программой мониторинга предусмотрено определение на реперных объектах удельной активности в почвах и растениях долгоживущих естественных радионуклидов (ЕРН), к основным представителям которых относятся калий-40 (⁴⁰K), торий-232 (²³²Th) и радий-226 (²²⁶Ra) (продукт распада тория-230 в цепи распада урана-238) [2, 6].

Российскими нормативами регламентированы дифференцированные в зависимости от гранулометрического состава и кислотности почв ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) некоторых ТМ и мышьяка. Например, для суглинистых и глинистых почв с $pH_{KCl} > 5,5$ ОДК кадмия составляет 2, мышьяка – 10, свинца – 130, цинка – 220 мг/кг. Предельно допустимая концентрация (ПДК) валовой ртути зафиксирована на уровне 2,1 мг/кг. Кроме того, в России установлены ПДК подвижных форм цинка (23 мг/кг) и свинца (6 мг/кг)². Для нормирования содержания ИРН российским законодательством установлена система зонирования территории в зависимости от плотности загрязнения цезием-137 (критический радионуклид)³ [2].

¹ Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения: ГОСТ Р 70281-2022. Введ. 01.01.2023. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. 5 с.

² Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Гл. гос. санитар. врача Рос. Федерации от 28.01.2021 № 2 // Консультант.Плюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 08.04.2024).

³ О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС: Закон Рос. Федерации от 15.05.1991 № 1244-1 // Консультант.Плюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 08.04.2024).

В пищевой продукции и кормах для сельскохозяйственных животных нормируется содержание свинца, кадмия, ртути и мышьяка, а также удельная активность цезия-137 и стронция-90¹. Для цинка регламентированы только максимальные допустимые уровни (МДУ) содержания в кормовой продукции².

Цель исследований – агроэкологическая оценка содержания тяжелых металлов (цинк, свинец, кадмий, ртуть) и мышьяка, а также удельной активности естественных (калий-40, торий-232, радий-226) и искусственных радионуклидов (цезий-137, стронций-90) в черноземах выщелоченных, типичных, обыкновенных и растениеводческой продукции в Белгородской области.

Объекты и методы. Исследования проводили в Белгородской области, которая находится в юго-западной части Центрально-Черноземного экономического района России. В почвенном покрове лесостепной зоны области преобладают черноземы типичные и выщелоченные, а степной – черноземы обыкновенные (рис. 1) [8].

Исследования по изучению содержания ТМ и мышьяка в почвах и растениях проводили в течение 2016–2024 гг. на реперных объектах (участки поля площадью 4–40 га). Почвенные пробы отбирались перед посевом сельскохозяйственных культур (табл. 1). Образцы растений отбирались на реперных объектах лесостепной зоны перед началом уборки урожая³.

Исследования по изучению удельной активности радионуклидов в почвах и растениях проводились на черноземах типичных и выщелоченных в лесостепной зоне (Ракитянский р-н)

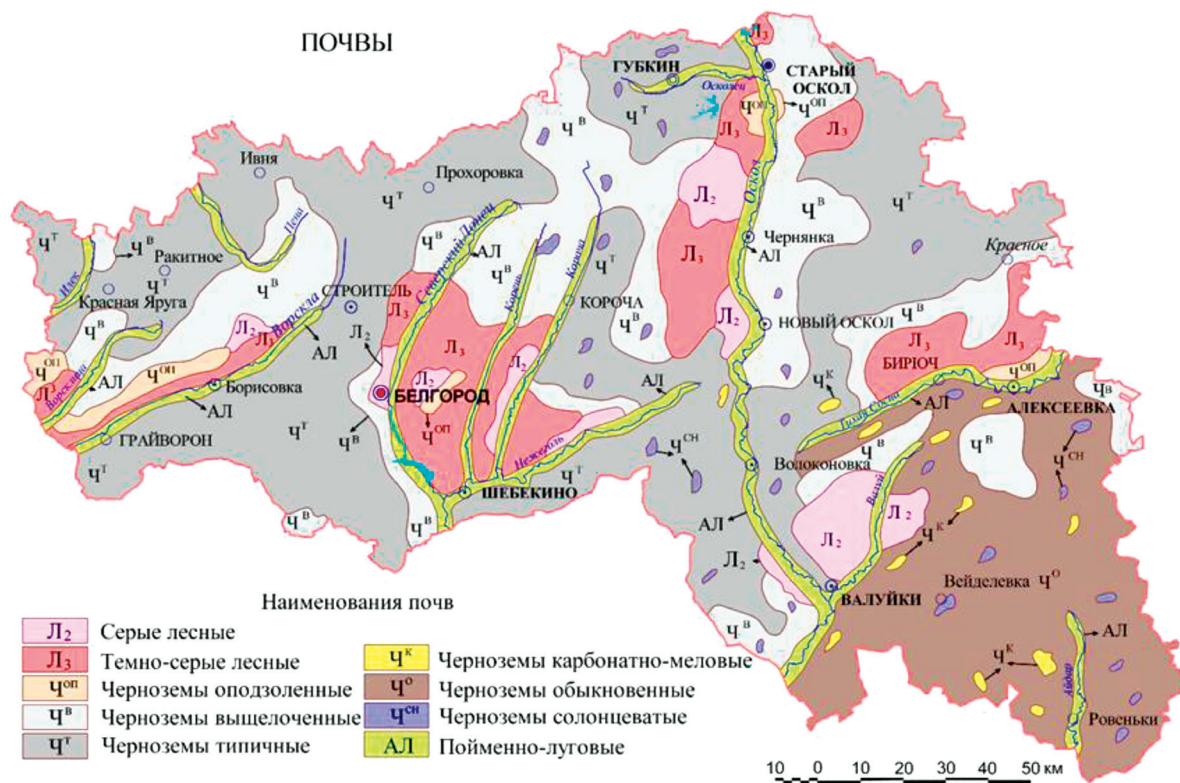


Рис. 1. Почвенный покров Белгородской области [8]

Fig.1. Soil cover of the Belgorod region [8]

¹ О безопасности зерна: ТР ТС 015/2011: (с изменениями на 15 сентября 2017 года) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320395> (дата обращения: 11.04.2024).

² Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках: утв. Гл. упр. ветеринарии Гос. агропром. ком. СССР 7 авг. 1987 г. // Меганорм: система нормат. док. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293725/4293725464.htm> (дата обращения: 08.04.2024).

³ Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Всерос. науч.-исслед. ин-т агрохимии, Почв. ин-т им. В. В. Докучаева; разраб.: В. Г. Сычёв [и др.]. М.: Росинформгортех, 2003. 240 с.

Таблица 1. Характеристика почв (слой 0–25 см) реперных участков при проведении обследования на содержание тяжелых металлов

Table 1. Characteristics of soils (0–25 cm layer) of reference sites during survey for heavy metal content

Почва	Содержание, %		pH _{H₂O}
	физической глины	органического вещества	
Чернозем выщелоченный	56,2	5,4	6,3
Чернозем типичный	56,8	5,6	6,7
Чернозем обыкновенный	72,5	5,2	7,8

Таблица 2. Характеристика почв (слой 0–25 см) реперных участков при проведении радиологического обследования

Table 2. Characteristics of soils (layer 0–25 cm) of reference areas during radiological examination

Почва	Содержание, %		pH _{H₂O}
	физической глины	органического вещества	
Чернозем выщелоченный	53,9	5,4	6,3
Чернозем типичный	55,1	5,5	6,6
Чернозем обыкновенный	72,5	5,6	7,8

и на черноземах обыкновенных – в степной (Вейделевский р-н) (табл. 2). Выборка для каждого подтипа почв состояла из 20 проб.

Пробы почв и растений отбирались по общепринятой в агрохимической службе методике. Все аналитические исследования проводили в аккредитованной испытательной лаборатории. Содержание кислоторастворимых форм ТМ (экстрагент 5М HNO₃) и концентрацию извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 их подвижных форм в почве определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Концентрацию мышьяка в образцах почвы, растениеводческой продукции и удобрений определяли фотометрическим методом¹.

Определение удельной активности калия-40, тория-232, радия-226 и цезия-137 во всех образцах и стронция-90 в пробах растениеводческой продукции², а также стронция-90 в почвенных пробах³ проводили по общепринятым методикам. При статистической обработке данных мониторинга использовалась программа для ЭВМ ГИС «Агрэколог Онлайн» [9].

Результаты и их обсуждение. *Радионуклиды в агроэкосистемах.* Величина естественного радиационного фона во многом определяется концентрацией в почвах естественных радионуклидов. В свою очередь, на содержание ЕРН в почвах очень сильно влияют такие ее свойства, как гранулометрический и минералогический состав, величина pH, концентрация органического углерода и др. Повышение содержания в почвах физической глины (частиц размером менее 0,01 мм), как правило, сопровождается увеличением удельной активности ЕРН [2, 10, 11].

Для почв планеты минимальные границы варьирования удельной активности калия-40, тория-232 и радия-226 оцениваются в 110, 7 и 11, а максимальные – в 740, 48 и 52 Бк/кг соответственно. При этом средняя удельная активность калия-40 составляет 370, а тория-232 и радия-226 – 26 Бк/кг [11]. В российских черноземах минимальные границы варьирования удельной активности калия-40, тория-232 и радия-226 оцениваются в 390, 22 и 12, а максимальные – в 610, 42 и 34 Бк/кг. Средняя удельная активность калия-40 оценивается в 500, тория-232 – 31,7, радия-226 – 23,1 Бк/кг [11].

В Белгородской области по средней величине удельной активности ЕРН образуют следующие убывающие ряды (Бк/кг): черноземы выщелоченные – калий-40 (539) > торий-232 (39,2) > радий-226 (17,3); черноземы типичные – калий-40 (544) > торий-232 (42,9) > радий-226 (17,4); черноземы обыкновенные – калий-40 (573) > торий-232 (46,7) > радий-226 (18,9).

¹ Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв ...

² Методика измерений удельной активности природных радионуклидов, цезия-137, стронция-90 в пробах объектов окружающей среды и продукции предприятий с применением спектрометра-радиометра гамма- и бета-излучений МКГБ-01 «РАДЭК» и гамма-спектрометра МКСП-01 «РАДЭК»: ФР.1.38.2011.10033.

³ Почвы. Метод определения ⁹⁰Sr: ГОСТ Р 54041-2010. Введ. 01.01.2012. М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.

Исследуемые почвы существенно не различались по величине средней удельной активности калия-40 и радия-226. Минимальные пределы варьирования удельной активности калия-40 и радия-226 зафиксированы на отметках 460 и 11,3, максимальные – 714 и 28,5 Бк/кг соответственно (табл. 3). Величина удельной активности тория-232 в черноземах обыкновенных была выше, чем в выщелоченных, что объясняется более легким гранулометрическим составом последних. В черноземах выщелоченных минимальный предел варьирования удельной активности тория-232 составлял 30,4, типичных – 30,9, обыкновенных – 34,6 Бк/кг, а максимальный – 44,0; 52,0 и 59,7 Бк/кг соответственно.

Т а б л и ц а 3. Удельная активность естественных радионуклидов в пахотных почвах, Бк/кг

Table 3. Specific activity of natural radionuclides in arable soils, Bq/kg

Почва	Вариационно-статистические характеристики		
	доверительный интервал для среднего значения	пределы вариации	коэффициент вариации, %
^{40}K			
Чернозем выщелоченный	539 ± 21	460–610	8,3
Чернозем типичный	544 ± 22	468–620	8,4
Чернозем обыкновенный	573 ± 24	475–714	10,1
^{232}Th			
Чернозем выщелоченный	39,2 ± 1,6	30,4–44,0	9,1
Чернозем типичный	42,9 ± 2,2	30,9–52,0	12,9
Чернозем обыкновенный	46,7 ± 2,3	34,6–59,7	11,7
^{226}Ra			
Чернозем выщелоченный	17,3 ± 1,6	11,3–23,3	19,2
Чернозем типичный	17,4 ± 1,5	15,0–25,3	18,3
Чернозем обыкновенный	18,9 ± 1,2	16,4–28,5	15,4

Особенностью радиоактивного загрязнения почв цезием-137 является «пятнистость» и высокая неравномерность [2, 6]. Например, в 2025 г. в Лопатенском и Рожновском сельских поселениях Клинецкого района Брянской области стандартный интервал плотности загрязнения почв цезием-137 варьировал в пределах 0,2–26,0 и 2,7–38,7 Ки/км² соответственно [12].

В Белгородской области площадь земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных цезием-137 в пределах 1–5 Ки/км², занимала около 140 тыс. га. В основном эти земли находились в восточных районах области [2].

До катастрофы на Чернобыльской АЭС минимальный предел варьирования мощности дозы гамма-излучения составлял 0,06, максимальный – 0,11 мкЗв/ч. После радиоактивных выпадений (апрель – октябрь 1986 г.) в западной части области (Ракитянский р-н) минимальный предел варьирования данного параметра зафиксирован на уровне 0,08, максимальный – 0,46 мкЗв/ч. В восточной части (Алексеевский р-н) величина мощности дозы гамма-излучения достигала 1,76 мкЗв/ч. Поэтому для снижения величины данного параметра на землях сельскохозяйственного назначения была проведена отвальная обработка почвы на глубину более 30 см, что привело к заделке ИРН в подпахотный слой. В результате уже через год после проведенных мероприятий величина мощности дозы гамма-излучения существенно снизилась и варьировала в узком диапазоне – от 0,1 до 0,21 мкЗв/ч. На востоке области минимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 составлял 99, максимальный – 279, стронция-90 – 13 и 32 Бк/кг соответственно. На западе области удельная активность цезия-137 варьировала в пределах 15–96, стронция-90 – 9–24 Бк/кг.

В 2023–2024 гг. мощность дозы гамма-излучения на реперных объектах находилась в диапазоне от 0,07 до 0,12 мкЗв/ч. На черноземах типичных и выщелоченных западной части области средняя удельная активность цезия-137 достигала 11 Бк/кг, минимальный предел варьирования – 5,9, максимальный – 19,6 Бк/кг. Для черноземов обыкновенных в восточной части области отмечены

более высокие значения: минимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 находился на уровне 22,2, максимальный – 43,8, средняя величина – 35,3 Бк/кг. Удельная активность стронция-90 в западной части области зафиксирована в пределах менее 3, а в восточной – менее 5 Бк/кг.

Удельная активность ЕРН и ИРН в сельскохозяйственных культурах изменяется в широком диапазоне, что определяется различными химическими свойствами радионуклидов, видовыми и сортовыми особенностями растений, условиями вегетационного периода. Помимо удельной активности радионуклидов, на их транслокацию в растения влияют агрохимические свойства почв (кислотность, содержание органического вещества, элементов-антагонистов) и такие приемы агротехники, как известкование и внесение удобрений.

По результатам опубликованных исследований удельная активность калия-40 в зерне пшеницы в среднем соответствует значению 128 Бк/кг [13]. Минимальный предел варьирования удельной активности тория-232 и радия-226 в сене многолетних трав юга Тюменской области составляет 18,7 и 7,3, максимальный – 296 и 340 Бк/кг соответственно [13]. В растениях Алтая те же показатели для тория-232 колеблются от 1 до 50 Бк/кг при средней величине 8,13 Бк/кг [14].

В наших исследованиях, проведенных на черноземах обыкновенных, наиболее высокой удельной активностью калия-40 характеризовался эспарцет по сравнению с озимой пшеницей. Как правило, содержание калия в многолетних бобовых травах выше, чем в зерновых культурах. В сене эспарцета минимальный порог варьирования удельной активности калия-40 составлял 316, максимальный – 811. Среднее значение параметра находилось на уровне 597 Бк/кг, что было близко к удельной активности этого радионуклида в почве (573 Бк/кг). В зерне озимой пшеницы средняя величина этого показателя зафиксирована на уровне 111, минимальный предел варьирования находился на уровне 90, максимальный – 130 Бк/кг. В соломе этой культуры средняя величина параметра оказалась в 1,6 раза выше, составив 182 Бк/кг (при минимальном и максимальном пределах варьирования 136 и 231 Бк/кг соответственно) (рис. 2). Уровень удельной активности тория-232 и радия-226 в сельскохозяйственных растениях не превышал 6 и 8 Бк/кг соответственно.

В продуктах питания и кормах регламентируются предельные уровни удельной активности цезия-137 и стронция-90. Например, для продовольственного зерна допустимые значения этих радионуклидов не должны превышать 60 и 11 Бк/кг, а для фуражного – 180 и 100 Бк/кг соответственно¹.

В 1986 г. в менее загрязненных западных районах области в зерне озимых культур минимальный предел удельной активности цезия-137 составлял 9,3, максимальный – 91,8; для стронция-90 эти значения достигали 0,3 и 4,5 Бк/кг соответственно. В наиболее пострадавших восточных районах минимальные пределы удельной активности цезия-137 и стронция-90 зафиксированы на уровне 10,1 и 2,0, максимальные – 190 и 5,5 Бк/кг соответственно. Столь высокий уровень загрязнения продукции, видимо, был связан с попаданием радиоактивных выпадений непосредственно на вегетирующие растения. Однако уже через год минимальные и максимальные пределы варьирования удельной активности цезия-137 в зерне распределились таким образом: в западных районах – 1,3 и 3,4,

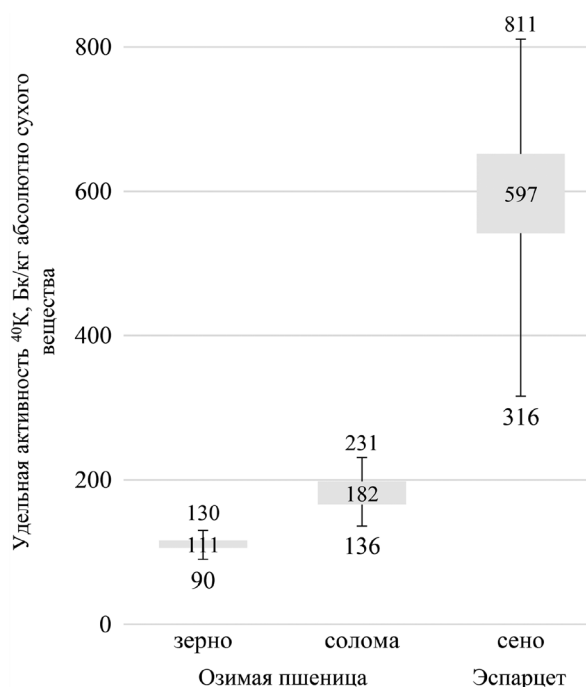


Рис. 2. Удельная активность калия-40 в растениеводческой продукции, Бк/кг

Fig. 2. Specific activity of potassium-40 in plant products, Bq/kg

¹ URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320395>.

в восточных – 1,4 и 5,9 Бк/кг соответственно. Для стронция-90 минимальные и максимальные пределы варьирования данного показателя соответствовали следующим значениям: в западных районах – 0,8 и 1,4, в восточных – 1,1 и 4,6 Бк/кг соответственно. Эти значения были существенно ниже предельных допустимых уровней содержания ИРН, установленных для продовольственного зерна. В последующие годы растениеводческой продукции с превышением предельных уровней удельной активности ИРН также не выявлялось.

Тяжелые металлы и мышьяк в агроэкосистемах. На территории Белгородской области существенным источником поступления ТМ в почвы агроэкосистем являются органические удобрения, средний уровень внесения которых достиг в 2019–2022 гг. 9,6 т/га [1]. Многочисленные результаты исследований свидетельствуют о загрязнении почв придорожных экосистем кадмием, цинком в результате изнашивания автомобильных шин и свинцом, который попадал в них до 2002 г., когда было разрешено использование этилированного бензина [1].

В изучаемых почвах варьирование уровня кислоторастворимых форм цинка находилось в пределах 23,2–52,5, свинца – 7,7–14,2, мышьяка – 3,15–7,13, кадмия – 0,15–0,41, ртути – 0,015–0,035 мг/кг. По среднему содержанию кислоторастворимых форм изучаемых элементов в пахотных черноземах выщелоченных образуется следующий убывающий ряд (мг/кг): цинк (36,1) > свинец (10,2) > мышьяк (4,22) > кадмий (0,21) > ртуть (0,020). В черноземах типичных выявлена аналогичная закономерность: цинк (36,5) > свинец (10,3) > мышьяк (4,18) > кадмий (0,23) > ртуть (0,022). В этих почвах существенных различий в наличии элементов не установлено. В пахотных черноземах обыкновенных по концентрации элементов образуется следующий ряд (мг/кг): цинк (42,9) > свинец (11,2) > мышьяк (5,48) > кадмий (0,35) > ртуть (0,023) (табл. 4). В пахотных черноземах обыкновенных количество кислоторастворимых форм цинка, мышьяка и кадмия было существенно выше, чем в черноземах выщелоченных и типичных. Кроме того, наблюдалась тенденция более высокой концентрации свинца и ртути в черноземах обыкновенных по сравнению с черноземами выщелоченными и типичными. Выявленные различия в аккумуляции элементов между черноземами выщелоченными и типичными (лесостепная зона) и обыкновенными (степная зона) во многом обусловлены более тяжелым гранулометрическим составом последних.

Установленные уровни содержания изучаемых элементов согласуются с результатами исследований, проведенных в других регионах России. Например, средние концентрации цинка, свинца, кадмия и ртути в черноземах обыкновенных Саратовской области оцениваются в 36,0; 14,7; 0,39 и 0,022 мг/кг соответственно [15]. В различных подтипах черноземов Средней Сибири количество ртути находится в пределах 0,019–0,029, Липецкой области – 0,02–0,03 мг/кг [16–18].

Общее содержание элементов в почвах не характеризует их доступность для растений, поэтому при проведении мониторинга для цинка, свинца и кадмия определяют концентрацию подвижных форм, однако для мышьяка и ртути такие исследования не используются. Варьирование концентрации подвижных форм цинка находилось в пределах 0,23–0,70; свинца – 0,28–0,73; кадмия – 0,02–0,08 мг/кг. По средней величине данного параметра образуются следующие убывающие ряды (мг/кг): черноземы выщелоченные – свинец (0,52) > цинк (0,41) > кадмий (0,06); черноземы типичные – свинец (0,46) > цинк (0,39) > кадмий (0,05); черноземы обыкновенные – свинец (0,55) > цинк (0,36) > кадмий (0,04). Существенных различий по данным параметрам между изучаемыми почвами не выявлено. Однако прослеживалась тенденция более высокой концентрации подвижных форм кадмия в черноземах выщелоченных по сравнению с черноземами обыкновенными, что, по-видимому, связано с менее кислой реакцией среды последних. Превышений российских нормативов предельного количества изучаемых элементов в почве не наблюдалось как в данных исследованиях, так и в ходе проведения сплошного эколого-токсикологического обследования, выполненного в более ранний период. Однако как агроэкологическую проблему следует рассматривать низкую обеспеченность черноземов подвижными формами цинка. По агрохимическим нормативам почвы считаются низкообеспеченными подвижным цинком при его концентрации менее 2 мг/кг. В наших исследованиях даже верхний предел варьирования этого параметра достигал всего 0,7 мг/кг. При такой низкой обеспеченности почв этим элементом его целесообразно вносить с микроудобрениями.

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах, мг/кг

Table 4. Content of heavy metals and arsenic in soils, mg/kg

Почва	Элемент	Вариационно-статистические показатели			
		количество проб	пределы вариации	доверительный интервал для среднего значения	коэффициент вариации, %
<i>Экстрагент 5M HNO₃</i>					
Чернозем выщелоченный	Pb	21	8,0–14,2	10,2 ± 0,5	10,1
	Zn	21	24,0–50,1	36,1 ± 2,8	17,3
	Cd	21	0,15–0,30	0,21 ± 0,02	22,1
	As	21	3,15–5,90	4,22 ± 0,40	21,3
	Hg	21	0,016–0,033	0,020 ± 0,002	20,6
Чернозем типичный	Pb	22	7,70–12,5	10,3 ± 0,5	10,0
	Zn	22	23,2–52,5	36,5 ± 2,9	18,0
	Cd	22	0,15–0,35	0,23 ± 0,02	22,0
	As	22	3,16–5,84	4,18 ± 0,38	20,7
	Hg	22	0,018–0,035	0,022 ± 0,002	20,3
Чернозем обыкновенный	Pb	22	9,5–13,0	11,2 ± 0,5	9,6
	Zn	22	33,6–50,5	42,9 ± 2,2	11,5
	Cd	22	0,27–0,41	0,35 ± 0,02	10,4
	As	22	4,10–7,13	5,48 ± 0,34	14,2
	Hg	22	0,015–0,035	0,023 ± 0,002	23,4
<i>Экстрагент ААБ с рН 4,8</i>					
Чернозем выщелоченный	Pb	21	0,31–0,73	0,52 ± 0,06	23,5
	Zn	21	0,24–0,70	0,41 ± 0,05	29,8
	Cd	21	0,03–0,08	0,06 ± 0,01	26,1
Чернозем типичный	Pb	22	0,28–0,63	0,46 ± 0,05	20,1
	Zn	22	0,24–0,68	0,39 ± 0,05	29,3
	Cd	22	0,02–0,07	0,05 ± 0,01	25,9
Чернозем обыкновенный	Pb	22	0,37–0,70	0,55 ± 0,05	17,1
	Zn	22	0,23–0,60	0,36 ± 0,04	25,0
	Cd	22	0,03–0,06	0,04 ± 0,01	16,2

Среднее содержание подвижных форм свинца и цинка в черноземах обыкновенных Саратовской области находится на уровне 0,82 и 0,72 мг/кг соответственно [15], что существенно выше, чем в почвах Белгородской области. В черноземах выщелоченных Липецкой области количество подвижных форм кадмия варьирует в диапазоне от 0,03 до 0,08 мг/кг, в черноземах обыкновенных Саратовской области – от 0,03 до 0,07 мг/кг [15, 18], что хорошо согласуется с результатами наших исследований.

Агроэкологические свойства почвенного покрова ареалов происхождения видов сельскохозяйственных растений во многом определяют особенности их химического состава [1]. Изучаемые элементы являются облигатными (обязательными) для живых организмов. Физиологическая роль цинка в метаболизме растений изучена достаточно полно. Этот металл входит в состав многих ферментов (ангидразы, дегидрогеназы, протеиназы и др.), участвующих в метаболизме жиров, углеводов и белков. Значение для растений свинца, кадмия, мышьяка, ртути изучено в меньшей степени, и большинство исследований направлено на выявление негативного влияния их высокой концентрации в почвах на урожайность и качество продукции [1, 19].

Цинк в основном накапливается в репродуктивных органах растений. В то же время защитные механизмы препятствуют транслокации свинца, кадмия, мышьяка, ртути в репродуктивные органы, поэтому, как правило, их содержание там ниже, чем в других частях растений. Концентрации в растениях цинка и свинца в пределах 20–60 и 0,5–10,0 мг/кг соответственно считаются нормальными (не приводящими к снижению урожайности). Токсичные для растений концентрации, при которых наблюдаются различные токсические симптомы, варьируют для цинка в пределах 300–500, для свинца – 30–300 мг/кг [1, 3, 5].

Согласно полученным нами результатам исследований минимальный порог варьирования концентрации цинка в изучаемых образцах находился на уровне 4,5 (солома сои), а максимальный – 47,3 мг/кг (зерно сои). Количество свинца варьировало в пределах от 0,11 мг/кг (сено клевера) до 0,95 (стебли подсолнечника), кадмия – от 0,01 (сено клевера) до 0,162 (семена подсолнечника), мышьяка – от 0,011 (зерно пшеницы) до 0,060 (солома озимой пшеницы), ртути – от 0,001 (зерно сои) до 0,018 мг/кг (солома пшеницы) (рис. 3). В растениеводческой продукции из разных регионов России концентрация ртути варьирует в диапазоне 0,0005–0,01, мышьяка – 0,020–0,046 мг/кг [16].

По среднему содержанию в злаковых культурах элементы образуют следующий убывающий ряд (мг/кг): зерно озимой пшеницы – цинк (28,6) > свинец (0,34) > кадмий (0,048) > мышьяк (0,023) > ртуть (0,008); зерно кукурузы – цинк (17,6) > свинец (0,31) > кадмий (0,045) > мышьяк (0,019) > ртуть (0,004). Концентрации цинка, мышьяка и ртути в зерне озимой пшеницы оказались существенно выше, чем в кукурузе. Содержание цинка в зерне кукурузы было самое незначительное по сравнению не только с зерном пшеницы, но и с зерном сои и семенами подсолнечника. По концентрации свинца и кадмия зерно пшеницы и кукурузы существенно не отличалось. Содержание цинка в зерне пшеницы и кукурузы было выше, чем в соломе, в среднем в 2,75 и 1,26 раза соответственно. В соломе озимой пшеницы концентрации свинца, мышьяка, кадмия и ртути оказались выше, чем в зерне, в 1,44; 1,26; 1,25 и 1,38 раза соответственно. Аналогичная закономерность, но в большей степени была характерна и для кукурузы. В ее соломе концентрация свинца, мышьяка, кадмия и ртути оказалась выше, чем в зерне, в 1,77; 1,26; 1,29 и 2,5 раза соответственно.

Данные, собранные в разных странах мира, позволяют констатировать, что концентрация кадмия в зерне пшеницы находится в интервале 0,02–0,07, среднее содержание свинца в зерне злаковых оценивается в 0,47 мг/кг. В Сибири количество кадмия в зерне яровой пшеницы находится в пределах 0,020–0,023, а ртути в среднем составляет 0,0016 мг/кг [16, 17]. В Центральном Черноземье концентрация свинца в зерне озимой пшеницы варьирует в пределах 0,26–0,41 мг/кг [1].

По концентрации элементов в зерне сои образуется следующий ряд (мг/кг): цинк (35,6) > свинец (0,18) > кадмий (0,072) > мышьяк (0,019) > ртуть (0,003). Среднее содержание цинка в зерне сои было в 5,56 раза выше, чем в соломе. В то же время в соломе этой культуры концентрации свинца, мышьяка, кадмия и ртути оказались выше, чем в зерне, в 1,22; 1,37; 1,15 и 3 раза соответственно. В зерне сои отмечена самая низкая, по сравнению с зерном пшеницы, кукурузы, семенами подсолнечника и даже сеном клевера, средняя концентрация свинца и ртути.

По среднему содержанию элементов в семенах подсолнечника образуется ряд (мг/кг): цинк (41,1) > свинец (0,36) > кадмий (0,09) > мышьяк (0,021) > ртуть (0,004). В основной продукции подсолнечника концентрации цинка и кадмия оказались в 2,82 и 1,29 раза выше, чем в побочной. Семена подсолнечника характеризовались самым высоким содержанием этих элементов из основной продукции изучаемых культур. Обобщенные данные из разных стран мира свидетельствуют, что средняя концентрация кадмия в семенах подсолнечника также достаточно высока и оценивается в 0,14 мг/кг, что в 1,56 раза больше, чем в наших исследованиях [5]. По-видимому, высокое содержание геохимически связанных металлов цинка и кадмия в семенах является биологической особенностью подсолнечника. В побочной продукции этой культуры концентрации свинца, мышьяка и ртути оказались выше, чем в семенах, в 1,61; 1,19 и 2,5 раза соответственно.

В сене клевера образуется ряд (мг/кг): цинк (16,5) > свинец (0,22) > мышьяк (0,021) > кадмий (0,014) > ртуть (0,004). В Средней Сибири концентрация кадмия в сене многолетних бобовых трав варьирует в пределах от 0,028 до 0,110 мг/кг, а среднее содержание ртути оценивается в 0,004 мг/кг [16].

Предельно допустимые концентрации свинца, мышьяка, кадмия и ртути для продовольственного зерна озимой пшеницы и кукурузы установлены на уровне 0,5; 0,2; 0,1 и 0,03 мг/кг соответственно. Для семян подсолнечника, применяемых на пищевые цели, ПДК свинца составляет 1,0, мышьяка – 0,3, кадмия – 0,2 и ртути – 0,05 мг/кг. Для зерна сои ПДК свинца установлена на уровне 1,0, мышьяка – 0,3, кадмия – 0,1 и ртути – 0,05 мг/кг⁴. Вся исследуемая продукция содержала изучаемые элементы в концентрациях ниже ПДК.

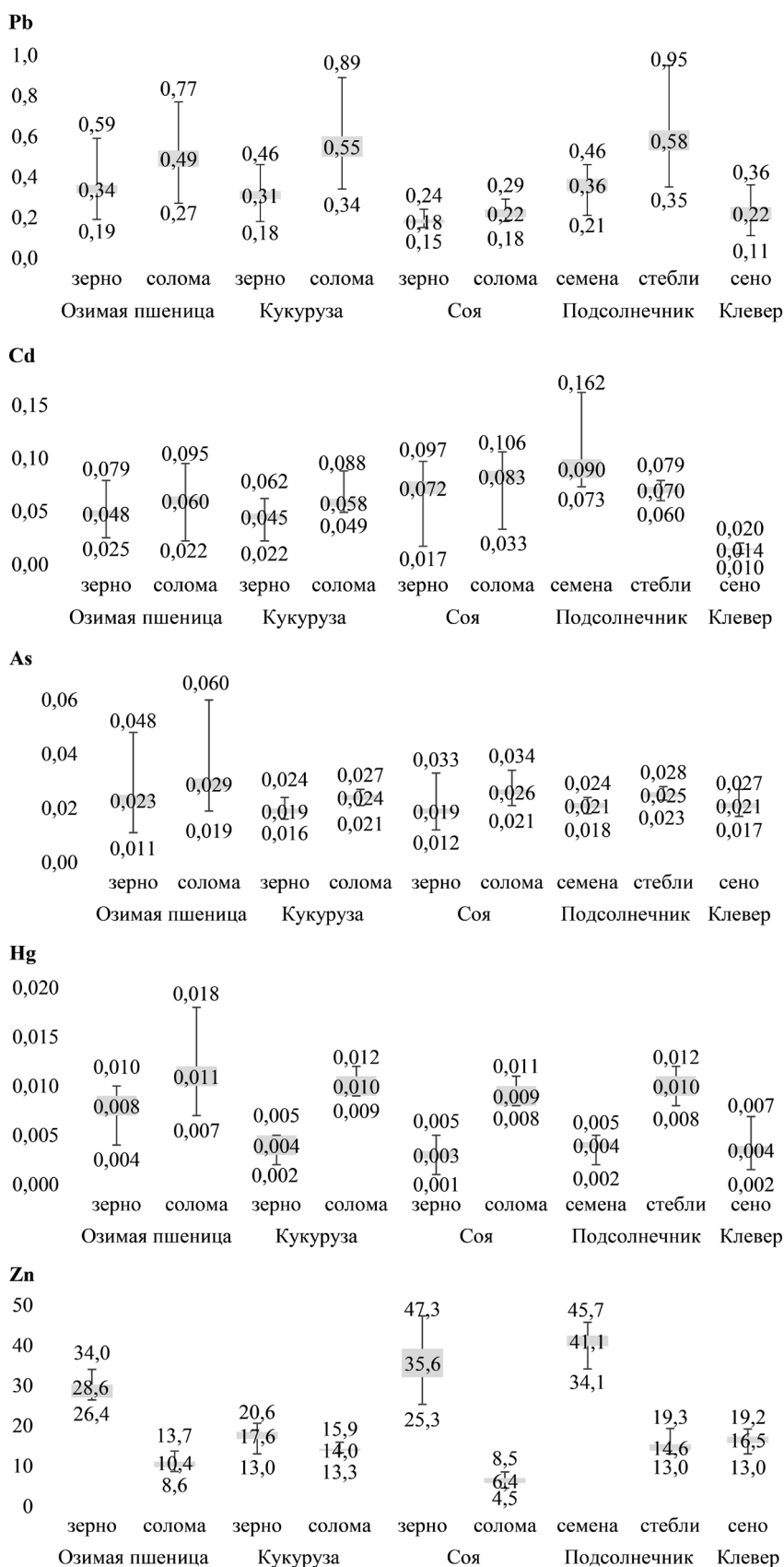


Рис. 3. Содержание мышьяка и тяжелых металлов в некоторых сельскохозяйственных растениях, мг/кг абсолютно сухого вещества

Fig. 3. Content of arsenic and heavy metals in certain agricultural crops, mg/kg of absolutely dry matter

Максимально допустимые уровни содержания цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути для фуражного зерна, грубых и сочных кормов составляют 50,0; 5,0; 0,5; 0,3 и 0,05 мг/кг¹. Превышения значений МДУ не наблюдалось.

Заключение. Таким образом, в ходе исследований установлено, что варьирование в изучаемых почвах удельной активности калия-40 составляет 460–714; тория-232 – 30,4–59,7; радия-226 – 11,3–28,5 Бк/кг. В 2023–2024 гг. максимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах не превышал 43,8 и 5,0 Бк/кг соответственно. Концентрация в почвах кислоторастворимых форм цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути изменялась в интервалах 23,2–52,5; 7,7–14,2; 3,15–7,13; 0,15–0,41; 0,015–0,035 мг/кг соответственно. В черноземах обыкновенных средняя удельная активность тория-232, а также концентрации кислоторастворимых форм цинка, мышьяка и кадмия были существенно выше, чем в черноземах выщелоченных, что обусловлено более легким гранулометрическим составом последних. Содержание подвижных форм ТМ по подтипам черноземов существенно не отличалось и варьировало в пределах: цинк – 0,23–0,70, свинец – 0,28–0,73, кадмий – 0,02–0,08 мг/кг. Превышений ОДК и ПДК элементов в почвах выявлено не было. В изучаемых сельскохозяйственных растениях удельная активность цезия-137, стронция-90, а также концентрации цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути были ниже предельно допустимых значений, регламентированных для пищевой и кормовой продукции.

Список использованных источников

1. Лукин, С. В. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах и сельскохозяйственных растениях Центрального Черноземья / С. В. Лукин // Почвоведение. – 2024. – № 10. – С. 1414–1423. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24100101>
2. Лукин, С. В. Радионуклиды (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr) в агроэкосистемах Центрального Черноземья / С. В. Лукин // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 519, № 2. – С. 156–162. <https://doi.org/10.31857/S2686739724120202>
3. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте / Ю. В. Алексеев. – СПб.: [Изд-во ПИЯФ РАН], 2008. – 216 с.
4. Шеуджен, А. Х. Агробиогеохимия чернозема / А. Х. Шеуджен. – Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2018. – 308 с.
5. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants / A. Kabata-Pendias. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
6. Израэль, Ю. А. Радиоактивное загрязнение земной поверхности / Ю. А. Израэль // Вестник Российской академии наук. – 1998. – Т. 68, № 10. – С. 898–915.
7. Зависимость содержания техногенных и естественных радионуклидов в почвах Центрального федерального округа от интенсивности применения минеральных удобрений и химических мелиорантов / П. М. Орлов, О. В. Гладышева, М. И. Лунев, Н. И. Аканова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2018. – № 1 (361). – С. 37–42. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11009>
8. Соловиченко, В. Д. Плодородие и рациональное использование почв Белгородской области / В. Д. Соловиченко. – Белгород: Отчий край, 2005. – 291 с.
9. Malysheva, E. S. Complex analysis of data from agrochemical and soil-erosion monitoring using geoinformation systems / E. S. Malysheva, A. V. Malyshev, I. G. Kostin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937. – Art. 032070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032070>
10. Rachkova, N. G. The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils / N. G. Rachkova, I. I. Shuktomova, A. I. Taskaev // Eurasian Soil Science. – 2010. – Vol. 43, № 6. – P. 651–658. <https://doi.org/10.1134/S1064229310060050>
11. Орлов, П. М. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты / П. М. Орлов, В. Г. Сычев, Н. И. Аканова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – Т. 63, № 4 (376). – С. 62–67. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-14074>
12. Орлов, П. М. Оценка доз внешнего облучения для сельскохозяйственных рабочих при проведении работ на загрязненной территории Брянской области / П. М. Орлов, Н. И. Аканова, С. Б. Говоркова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – Т. 68, № 3 (405). – С. 354–359. https://doi.org/10.55186/25876740_2025_68_3_354
13. Бурлаенко, В. З. Анализ активности природных радионуклидов в почвенно-растительном покрове на территории юга Тюменской области / В. З. Бурлаенко, С. П. Игашева // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9, № 3. – С. 32–36. <https://doi.org/10.17816/snv202093105>
14. Егорова, И. А. Особенности накопления радионуклидов в растениях Северо-западного Алтая / И. А. Егорова, Ю. В. Кислицина, А. В. Пузанов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 11 (61). – С. 32–38.

¹ URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293725/4293725464.htm>.

15. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
16. Побилат, А. Е. Экологическая оценка содержания ртути в агроценозах Средней Сибири / А. Е. Побилат, Е. И. Волошин // Микроэлементы в медицине. – 2019. – Т. 20, № 4. – С. 57–62. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62>
17. Побилат, А. Е. Микроэлементы в сельскохозяйственных растениях (обзор) / А. Е. Побилат, Е. И. Волошин // Микроэлементы в медицине – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 3–14. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-3-14>
18. Почвы Липецкой области / Ю. И. Сискевич, В. А. Никоноренков, О. В. Долгих [и др.]. – Липецк: Позитив Л, 2018. – 209 с.
19. Экологическая оценка содержания свинца, кадмия, ртути и мышьяка в агроэкосистемах юго-западной части Центрально-Черноземного района России: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Селюкова Светлана Викторовна; Белгор. гос. нац. исслед. ун-т. – Белгород, 2018. – 133 л.

References

1. Lukin S. V. Ecological assessment of concentrations of heavy metals and arsenic in soils and crops of the Central Chernozemic Region. *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 10, pp. 1709–1717. <https://doi.org/10.1134/S106422932460146X>
2. Lukin S. V. Radionuclides (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , and ^{90}Sr) in agroecosystems of the Central Chernozem Region. *Doklady Earth Sciences*, 2024, vol. 519, no. 2, pp. 2356–2361. <https://doi.org/10.1134/s1028334x24603134>
3. Alekseev Yu. V. *Heavy metals in the agrolandscape*. St. Petersburg, Petersburg Nuclear Physics Institute, 2008. 216 p. (in Russian).
4. Sheudzhen A. Kh. *Agrobiogeochemistry of chernozem*. Maikop, Poligraf-YuG Publ., 2018. 308 p. (in Russian).
5. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton, CRC Press, 2010. 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
6. Izrael' Yu. A. Radioactive contamination of the earth's surface. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Science*, 1998, vol. 68, no. 10, pp. 898–915 (in Russian).
7. Orlov P. M., Gladysheva O. V., Lunev M. I., Akanova N. I. The dependence of the content of technogenic and natural radionuclides in the soils of the Central Federal District on the intensity of application of mineral fertilizers and chemical ameliorants. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2018, no. 1 (361), pp. 37–42 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11009>
8. Solovichenko V. D. *Fertility and rational use of soils in Belgorod oblast*. Belgorod, Otchii krai Publ., 2005. 291 p. (in Russian).
9. Malysheva E. S., Malyshev A. V., Kostin I. G. Complex analysis of data from agrochemical and soil-erosion monitoring using geoinformation systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 937, art. 032070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032070>
10. Rachkova N. G., Shuktomova I. I., Taskaev A. I. The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils. *Eurasian Soil Science*, 2010, vol. 43, no. 6, pp. 651–658. <https://doi.org/10.1134/S1064229310060050>
11. Orlov P. M., Sychev V. G., Akanova N. I. Natural radionuclides in the soils of Russia and phosphate ores of the planet. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2020, vol. 63, no. 4 (376), pp. 62–67 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-14074>
12. Orlov P. M., Akanova N. I., Govorkova S. B. Assessment of external radiation dose for agricultural workers during work in the contaminated territory of the Bryansk region. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2025, vol. 68, no. 3 (405), pp. 354–359 (in Russian). https://doi.org/10.55186/25876740_2025_68_3_354
13. Burlaenko V. Z., Igasheva S. P. The analysis of natural radionuclides activity in the soil and vegetation cover in the south of the Tyumen region. *Samarskii nauchnyi vestnik = Samara Journal of Science*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 32–36 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/snv202093105>
14. Egorova I. A., Kislitsina Yu. V., Puzanov A. V. Features of radionuclide accumulation in plants of the Northwestern Altai. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2009, no. 11 (61), pp. 32–38 (in Russian).
15. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Heavy metals in ecosystems*. Saratov, Rakurs Publ., 2017. 178 p. (in Russian).
16. Pobilat A. E., Voloshin E. I. Ecological assessment of mercury content in the agroecosis of Central Siberia. *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 57–62 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62>
17. Pobilat A. E., Voloshin E. I. Microcells in agricultural plants (review). *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 3–14 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-3-14>
18. Siskevich Yu. I., Nikonorenkov V. A., Dolgikh O. V., Akhtyrtsev A. B., Sushkov V. D. *Soils of the Lipetsk Region*. Lipetsk, Pozitiv L Publ., 2018. 209 p. (in Russian).
19. Selyukova S. V. *Ecological assessment of lead, cadmium, mercury, and arsenic content in agroecosystems of the southwestern part of the Central Black Earth Region of Russia*. Belgorod, 2018. 133 p. (in Russian).

Информация об авторах

Сергей Викторович Лукин – член-корреспондент Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор Белгородского филиала ФГБУ «Агрохимическая служба России» (ул. Щорса, 8, 308027, Белгород, Российская Федерация); заведующий кафедрой агроэкологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (ул. Победы, 85, 308015, Белгород, Российская Федерация). Researcher ID: IZD-7722-2023, <https://orcid.org/0000-0003-0986-9995>. E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Говоркова Светлана Борисовна – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научно-методической работе, заведующий аспирантурой и докторантурой Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии имени Д. Н. Прянишникова (ул. Прянишникова, 31а, 127434, Москва, Российская Федерация). Researcher ID: OCL-1159-2025, <https://orcid.org/0009-0005-9664-0049>. E-mail: s.govorkova@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Lukin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Head of the Belgorod Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrochemical Service of Russia” (8, Shchorsa St., 308027, Belgorod, Russian Federation); Head of the Department of Agroecology, Belgorod State National Research University (85, Pobedy St., 308015, Belgorod, Russian Federation). ResearcherID: IZD-7722-2023, <https://orcid.org/0000-0003-0986-9995>. E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Svetlana B. Govorkova – Ph. D. (Agriculture), Deputy Director for Scientific and Methodological Work at the Federal State Budgetary Scientific Institution “Pryanishnikov Institute of Agrochemistry” (31a, Pryanishnikova St., 127434, Moscow, Russian Federation). Researcher ID: OCL-1159-2025, <https://orcid.org/0009-0005-9664-0049>. E-mail: s.govorkova@mail.ru

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

ЖЫВЁЛАГАДОЎЛЯ І ВЕТЭРЫНАРНАЯ МЕДЫЦЫНА
ANIMAL HUSBANDRY AND VETERINARY MEDICINE

УДК 639.371.043:597.42/.55

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-141-152>

Поступила в редакцию 24.09.2025

Received 24.09.2025

Ж. В. Кошак¹, С. М. Дегтярик¹, Д. Н. Денисов²

¹*Институт рыбного хозяйства, Национальная академия наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Научно-производственный центр «Экобиосфера», Жиздра, Российская Федерация*

**КОМБИКОРМА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ДЛЯ ОСЕТРОВЫХ И ЛОСОСЕВЫХ РЫБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ**

Аннотация. Проанализировано становление категории функциональных комбикормов в современной аквакультуре. На основе изучения специфического воздействия биоактивных добавок на организм рыб раскрыто содержание данного понятия и обоснована актуальность его внедрения в практику выращивания ценных видов рыб (осетровых и лососевых). Установлено, что использование биологически активных добавок позволяет трансформировать традиционные корма в функциональные, наделяя их лечебно-профилактическими свойствами, выходящими за рамки стандартных показателей питательности. Представлены результаты разработки РУП «Институт рыбного хозяйства», касающиеся создания рецептур, обогащенных биологически активными гуминовыми веществами. Раскрыт механизм комплексного воздействия данных компонентов и доказано, что применение разработанных функциональных кормов способствует восстановлению морфофункционального состояния печени после скармливания высокоэнергетических рационов, нормализует обмен веществ и повышает резистентность к стрессовым факторам. Экспериментально подтверждено улучшение рыбоводных показателей (повышение выживаемости, увеличение среднесуточных привесов и снижение кормового коэффициента). Полученные результаты обосновывают экономическую эффективность использования функциональных добавок в интенсивном рыбоводстве и подтверждают высокую значимость разработок для импортозамещения в сегменте высокотехнологичных кормов.

Ключевые слова: комбикорма, осетровые рыбы, радужная форель, гуминовые вещества, обмен веществ, состояние печени, содержание гликогена в печени

Для цитирования: Кошак, Ж. В. Комбикорма функционального назначения для осетровых и лососевых рыб с использованием гуминовых веществ / Ж. В. Кошак, С. М. Дегтярик, Д. Н. Денисов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 141–152. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-141-152>

Zhanna V. Koshak¹, Sviatlana M. Degtyarik¹, Danil N. Denisov²

¹*Fish Industry Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific and Production Center “Ecobiosphere”, Zhizdra, Russian Federation*

**FUNCTIONAL-PURPOSE COMPOUND FEED FOR STURGEON AND SALMON FISH
CONTAINING HUMIC SUBSTANCES**

Abstract. This article analyzes the development of the functional feed category in modern aquaculture. Based on a study of the specific effects of bioactive additives on fish, the concept is explored and the relevance of its implementation in the cultivation of valuable fish species (sturgeon and salmon) is substantiated. It is established that the use of biologically active additives allows for the transformation of traditional feeds into functional ones, imparting therapeutic and prophylactic properties that go beyond standard nutritional indicators. The results of the development of formulations enriched with biologically active humic substances by the Fish Industry Institute, a state-owned enterprise, are presented. The mechanism of the complex action of these components is revealed, and it is proven that the use of the developed functional feeds promotes the restoration of the morphofunctional state of the liver after feeding high-energy diets, normalizes metabolism, and increases resistance

to stress factors. Improved fish farming performance (increased survival, increased average daily weight gain, and a decrease in the feed conversion factor) has been experimentally confirmed. The obtained results substantiate the economic efficiency of using functional additives in intensive fish farming and confirm the high significance of developments for import substitution in the high-tech feed segment.

Keywords: compound feed, sturgeon, rainbow trout, humic substances, metabolism, liver condition, glycogen content in the liver

For citation: Koshak Zh. V., Degtyarik S. M., Denisov D. N. Functional-purpose compound feed for sturgeon and salmon fish containing humic substances. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 141–152 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-141-152>

Введение. Термин «функциональный комбикорм» в настоящее время нормативно не определен, однако, по сути, он идентичен понятию «функциональные продукты питания». Это специализированные корма, которые, помимо базовой нутритивной ценности, за счет обогащения дополнительными ингредиентами, новыми или уже существующими, приобретают дополнительные свойства [1]. Интенсификация рыбоводства подразумевает обязательное кормление рыбы. Для выращивания ценных видов рыб используют комбикорма, которые содержат более 40 % сырого протеина и более 20 % сырого жира, большое количество витаминов и минералов [2, 3]. Жиры в составе кормов легко окисляются при хранении и становятся токсичными для рыб. Для предотвращения окисления жиров обычно вводится значительный объем различных антиоксидантов, что увеличивает сроки хранения в ряде случаев до 18 месяцев [4]. В последние годы рыбоводы отмечают, что использование кормов с длительным сроком хранения приводит к стеатозу (побелению) и цирроидному перерождению печени, отмечаются дегенеративные изменения в почечных канальцах. Поскольку в состав кормов обязательно вводится рыбий жир, при длительном хранении содержащиеся в нем жирорастворимые витамины E и D (даже при наличии антиоксидантов) разрушаются. Например, содержащиеся в жире кальциферолы (витамин D) разрушаются с образованием ядовитого вещества – токсистерола [5]. Для удешевления кормов наравне с рыбным жиром используются растительные масла. Это приводит к тому, что в комбикормах нарушается соотношение полиненасыщенных жирных кислот. Если в естественной пище рыб соотношение незаменимых жирных кислот $\omega 3$ (22 : 6 к 20 : 5) равно примерно 2 : 1, то в комбикормах, особенно со смесью рыбьего жира и растительных масел, это соотношение 1 : 1 и менее [6].

Использование комбикормов, не полностью сбалансированных по аминокислотам, ненасыщенным жирным кислотам, вызывает расстройство физиологических функций, снижение иммунитета и приводит к нарушению обменных процессов в печени. При такой деградации жизненно важной железы организм не в состоянии функционировать дальше, что и отмечается как процесс вялотекущей гибели рыбы [7, 8].

Таким образом, патологии, индуцируемые несбалансированными кормами, а также иными неблагоприятными факторами окружающей среды, представляют значительную угрозу для рентабельности рыбоводной отрасли. Для профилактики и лечения этих заболеваний применяют иммуномодуляторы, средства для регуляции стресса, разрабатываются различные методы воздействия на физиологические механизмы снижения заболеваемости, используются методы биотехнологии, вакцинирования и другие подходы. В целом недостатком этих методов является высокая затратность [9]. В этой связи поиск доступных и высокоэффективных биологически активных компонентов отечественного производства является приоритетной задачей.

В последнее время всё большее внимание исследователей привлекают кормовые добавки на основе гуминовых веществ. Они могут быть использованы для повышения эффективности выращивания объектов животноводства, в том числе аквакультуры [10, 11].

Кормовые добавки представляют собой низкомолекулярные водные растворы, содержащие комплекс гуминовых кислот, фульвовую кислоту, сквален, ненасыщенные жирные кислоты, микроэлементы и аминокислоты. Гуминовые кислоты стабилизируют кишечную микрофлору и способствуют повышению усвояемости питательных веществ, что повышает эффективность кормления. Это позволяет добиться увеличения живого веса без повышения количества корма в рационе.

Гуминовые вещества легко формируют хелатные комплексы с тяжелыми металлами (например, с такими опасными, как кадмий) и затем эффективно выводят их из организма, что позволяет сохранять здоровье поголовья и улучшать качество продукции рыбоводства. Выраженное хелатное действие гуминовых веществ при такой детоксикации заключается в реализации химического механизма транспортирования хелатных соединений [14]. Обладая высокой биологической активностью, сложные органические молекулы гуминовых веществ являются естественным элементом многих водоемов, в основном пресноводных. В аквакультуре гуминовые соединения способствуют увеличению продолжительности жизни рыбы за счет индукции «мягкого» стресса (горемезиса), повышающего резистентность к выраженному стрессу. Установлено, что воздействие гуминовых соединений в концентрации 50–90 мг/л снижает заболеваемость и смертность рыбы. В частности, включение кормовых добавок с различным содержанием гуминовых кислот в рацион карпа обыкновенного (*Cyprinus carpio*) стимулирует набор массы, снижает смертность, способствует повышению уровня неспецифической резистентности, индуцируя защиту от инфицирования *A. hydrophila* [15].

О влиянии гуминовых кислот на активацию неспецифической резистентности организма животных свидетельствует тот факт, что включение гумата натрия в состав кормов для кроликов приводит к росту показателей фагоцитоза (активность, число и индекс) в 1,3–2,0 раза. У морских свинок на 14-е сутки после введения препарата тоже отмечается отчетливое возрастание фагоцитарной активности лейкоцитов. Способность гумата натрия стимулировать гуморальные факторы защиты подтверждается данными об увеличении активности лизоцима в сыворотке крови на 7-е (26,0 %), 14-е (41,6 %) и 21-е (43,3 %) сутки эксперимента. Под влиянием гумата натрия резко возрастала цитотоксическая активность клеток в вилочковой железе (в 9 раз), селезенке (в 2 раза), мезентериальных лимфатических узлах (в 3 раза) [16, 17]. Установлено положительное профилактическое действие данного соединения на развитие серотониновых язв: у животных опытной группы, получавших в рационе гумат натрия, регистрировали только воспаление, в то время как у контрольной группы животных (не получавшей его в профилактических целях) происходило изъязвление в эпителиальном слое. При изучении влияния гуминового комплекса на течение токсической анемии, вызванной фенилгидразином, установлено положительное воздействие на динамику заболевания: уровень гемоглобина и эритроцитов восстанавливается быстрее, что приводит к снижению процента гибели животных в эксперименте [18].

Анализ научной литературы по вопросу влияния гуминовых кислот на активность трипсина (субстрат – казеин) позволил выявить механизм конкурентного взаимодействия казеина и гуминовой кислоты за активный центр фермента трипсина. Гуминовые кислоты образуют с трипсином фермент-ингибиторный комплекс, который может диссоциировать в обратном направлении. При этом образования продуктов реакции не происходит, однако наибольшая степень ингибирования отмечена при низких концентрациях щелочного раствора гуминовых кислот. Данный факт обусловлен тем, что в разбавленных растворах этих соединений происходит разворачивание полимерной цепи гуминовых кислот, наряду с этим возникает вероятность изменения конфигурационных состояний. Вероятно, поэтому происходит образование комплекса трипсин – гуминовая кислота и степень ингибирования возрастает. Таким образом, гуминовые кислоты нормализуют обменные процессы и в то же время активизируют регенерацию [19].

Цель исследования – разработка комбикормов функционального назначения, способствующих повышению выживаемости и нормализации обмена веществ (в частности, функций печени) ценных видов рыб при интенсивном выращивании.

Материалы и методы исследований. Объектами для исследований служили: кормовая комплексная добавка «ZOO Экобиосфера», комбикорм для осетровых рыб «Гумокорм», комбикорм для радужной форели с гуминовыми веществами; сеголетки осетровых рыб (стерлядь и ленский осетр) и радужной форели, а также пробы тканей печени подопытных рыб.

Показатели качества кормовой добавки, содержащей гуминовые вещества, определяли в соответствии с ГОСТ Р 52221-2010. Химический состав комбикормов и мышечной ткани рыбы исследовали общепринятыми методами: содержание сырого протеина – по ГОСТ 13496.4-2019,

сырого жира – по ГОСТ 13496.15-2016, сырой клетчатки – по ГОСТ 13496.2-91, влажность – по ГОСТ 13496.3-92 (ИСО 6496-83) с использованием ИК-анализатора SpectraStar (США).

Минерализацию для определения содержания токсичных элементов выполняли согласно ГОСТ 26929-94. Оценку микро- и макроэлементного состава (кальций, медь, железо, магний, марганец, калий, натрий и цинк) проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии по ГОСТ 32343-2013, дополнительно содержание кальция контролировали согласно ГОСТ 26570-95. Токсичность для рыб устанавливали в соответствии с общепринятыми методиками¹.

Первый этап испытаний на рыбе осуществляли в аквариальных помещениях института в аквариумах объемом по 250 л. Для проведения испытаний по определению ростовых показателей в каждый аквариум помещали по 20 рыб. Количество повторностей на каждый вариант кормления – не менее четырех. Второй этап исследований проводили на базе рыбоводных хозяйств республики – ОАО «Опытный рыбхоз «Селец» и ОАО «Рыбхоз «Альба».

Для этого вырабатывали экструдированные комбикорма на экспериментальной линии по производству комбикормов для рыб, разработанной в РУП «Институт рыбного хозяйства». В состав линии входят измельчитель, дозатор, смеситель, аппарат для влаготепловой обработки, экструдер, сушилка-охладитель, а также установка для вакуумного напыления жира и других жидких и порошкообразных компонентов без подогрева.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе определяли химический состав исследуемой кормовой добавки. Результаты, систематизированные в табл. 1–2, подтверждают, что кормовая комплексная добавка «ZOO Экобиосфера» содержит свободные гуминовые кислоты, а также богата кальцием и калием, что может быть использовано при балансировке рецептов комбикормов по их содержанию. Кроме того, значительное содержание в препарате марганца и железа позволяет оптимизировать дозировку этих элементов в премиксах для ценных видов рыб.

Таблица 1. Показатели качества кормовой добавки

Table 1. Quality indicators of feed additives

Образец	Массовая доля влаги, %	Зольность, %	Концентрация щелочи, г/дм ³	Выход свободных гуминовых кислот, %	Массовая доля азота, %	pH
Кормовая комплексная добавка «ZOO Экобиосфера» (жидкая)	96,02 ± 0,11	43,43 ± 0,13	48,99 ± 0,47	0,57 ± 0,54	1,01 ± 0,06	8,28 ± 0,02

Таблица 2. Содержание макроэлементов в кормовой добавке

Table 2. Macro-nutrient content in the feed additive

Образец	Содержание макро- и микроэлементов, мг/100 г			
	K	Na	Ca	Mg
Кормовая комплексная добавка «ZOO Экобиосфера» (жидкая)	299,580	199,511	596,483	51,646
	Cu	Zn	Mn	Fe
	0,721	1,944	2,424	116,365

Определено общее микробное число (ОМЧ) добавки, которое составило 112 000 КОЕ/г. Данный показатель соответствует требованиям Ветеринарно-санитарных правил (постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 10.02.2011 № 10), согласно которым ОМЧ кормовых добавок должно составлять не более 5×10^5 КОЕ/г.

¹ Методические указания по определению токсических свойств препаратов, применяемых в ветеринарии и животноводстве // Ветеринарные препараты: справочник / под ред. А. Д. Третьякова; сост.: Л. П. Маланин, А. П. Морозов, А. С. Селиванова. М., 1988. С. 239–289; Методические указания по токсикологической оценке химических веществ и фармакологических препаратов, применяемых в ветеринарии / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ветеринарии им. С. Н. Вышеселского; сост.: А. Э. Высоцкий [и др.]. Мн.: [б. и.], 2007. 153 с.

На следуючым этапе исследований на лабораторной научной линии изготовлены комбикорм для осетра по ТУ ВУ 100035627.029-2022 и комбикорм для радужной форели по ТУ ВУ 100035627.026-2020. Была определена острая токсичность кормов с введением гуматов в концентрациях 6 % (в 0,5 раза выше функциональной дозы) и 10 % (в 2,5 раза выше).

Указанными кормами кормили сеголетка стерляди и радужной форели в опытных группах в течение 14 сут из расчета 3 % от массы тела рыбы. Особи контрольной группы получали комбикорм аналогичного состава, но без введения гуминовых веществ. Всего в эксперименте использовано по 50 сеголеток стерляди и радужной форели.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии острой токсичности для осетровых рыб и радужной форели кормов при введении в рацион добавок с гуминовыми веществами в концентрациях 6–10 %. Поедаемость корма во время и после эксперимента была в норме. Изменений поведения и физиологического состояния рыбы по сравнению с контролем либо ее гибели не отмечено ни в одном варианте опыта. На протяжении 14 сут наблюдения после окончания экспериментов патологических изменений и отклонений в поведении у подопытных рыб не выявлено. При патологоанатомическом вскрытии отмечено, что состояние внутренних органов опытной группы находилось в пределах нормы и отличалось от контрольной в лучшую сторону (отмечались более темный цвет и естественная консистенция печени).

Для изучения хронической токсичности корма с введением минимальной концентрации препаратов (3 %) комбикорм скармливали из расчета 1,5 % от массы посаженной на эксперимент рыбы 21 сут подряд, без перерыва; наблюдение вели на протяжении 30 сут после окончания опыта. Рыба из контрольной группы получала комбикорм аналогичного состава, но без введения гуминовых препаратов. Использовано по 30 экз. сеголеток стерляди и радужной форели.

Отмечено, что изменений поведения и физиологического состояния, возбуждения либо гибели рыбы, не наблюдалось ни при проведении опытов, ни во время периода последующего наблюдения. Рыба в опытных аквариумах не отличалась от контрольной, она активно двигалась и питалась. Состояние (размер, цвет, консистенция) внутренних органов подопытных рыб также находилось в пределах физиологической нормы. Был определен гепатосоматический индекс (ИП) и содержание гликогена в печени стерляди и радужной форели (табл. 3).

Обобщая показатели табл. 3, можно сделать вывод, что наибольшее снижение содержания гликогена в печени осетровых рыб наблюдается при кормлении комбикормом с дозировкой 3,0 % – на 41 % по сравнению с фоновым значением (до кормления). В то же время индекс печени существенно понижен: 0,98 % при норме 2 %. Наибольшее снижение гликогена в печени радужной форели наблюдается при кормлении комбикормом с дозировкой 3,0 % – на 38 % по сравнению с состоянием печени до кормления. В то же время индекс печени понижен незначительно: 1,96 % при норме 2 %. Снижение индекса печени связано с патологическими процессами: пострадавшие клетки печени отмирают, и для восстановления печени до нормальных размеров потребуется время.

Таблица 3. Гепатосоматический индекс и содержание гликогена в печени стерляди и радужной форели при кормлении комбикормом с добавлением кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»

Table 3. Hepatosomatic index and glycogen content in the liver of sturgeon and rainbow trout fed with compound feed with the addition of the feed complex additive "ZOO Ecobiosphere"

Дозировка кормовой добавки	Индекс печени, %	Содержание гликогена, %
Стерлядь до кормления (0 %)	2,05	71,19 ± 1,53
3,0 %	0,98	41,92 ± 3,07
6,0 %	1,95	63,41 ± 0,00
10,0 %	3,08	61,49 ± 3,84
Радужная форель до кормления (0 %)	2,18	42,15 ± 1,12
3,0 %	1,96	26,18 ± 1,30
6,0 %	1,98	36,18 ± 3,12
10,0 %	3,12	38,12 ± 1,11

Таким образом, корма с добавлением кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера» в концентрации 3–10 % не обладают острой и хронической токсичностью для осетровых и лососевых рыб.

На основании ранее проведенных испытаний по токсичности и анализа полученных результатов (см. табл. 3) в состав комбикормов для осетровых рыб и радужной форели вводили оптимальное количество кормовой добавки, а именно 3,0 % комплексной кормовой добавки «ZOO Экобиосфера». В состав комбикормов также были включены следующие компоненты: рыбная мука, соевый концентрат, молоко сухое обезжиренное, дрожжи кормовые, альбумин, глютен кукурузный, рыбий жир, пшеница, кормовая добавка с гуматами, премикс для ценных видов рыб, закрепитель гранул, шунгит, добавка-фитогеник Сагарва. Соотношение компонентов различно для осетровых рыб и радужной форели и зависит от особенностей их физиологии. Характеристика качества разработанных комбикормов приведена в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Показатели качества комбикормов для осетровых рыб и радужной форели

Table 4. Quality indicators of compound feed for sturgeon and rainbow trout

Образец комбикорма с 3 % кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»	Влажность, %	Сухое вещество, %	Содержание сырого протеина, %	Содержание сырого жира, %	Содержание сырой клетчатки, %
Для осетровых рыб	10,82 ± 0,10	89,18 ± 0,10	50,74 ± 0,92	12,40 ± 0,11	1,82 ± 0,02
Для радужной форели	10,26 ± 0,02	89,74 ± 0,02	48,86 ± 0,02	20,41 ± 0,04	1,53 ± 0,09

Для установления эффективности кормления комбикормами, содержащими гуминовые вещества, и их функционального влияния на организм рыб был проведен эксперимент по кормлению сеголетков радужной форели и ленского осетра. Рыба содержалась в аквариумах объемом по 250 л каждый. Подбор опытных групп осуществлялся таким образом, чтобы начальная масса рыбы в одном аквариуме незначительно отличалась от массы в двух других аквариумах одного варианта опыта. Следовательно, в каждом аквариуме масса посаженной рыбы была максимально близкой. В течение эксперимента проводили контроль за температурным режимом и содержанием растворенного в воде кислорода. Средняя температура воды в течение опыта для ленского осетра находилась в пределах (20,5 ± 2,4) °С, для радужной форели – (16,0 ± 1,4) °С. Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 8 мг O₂/л [1]. Кормление производилось вручную 3 раза в сутки. Суточные нормы кормления рассчитывали от массы тела рыбы; они составляли от 1,0 до 1,5 % с учетом хорошей поедаемости корма. Учет корма велся ежедневно. Кормление осуществляли в течение 90 сут. Выживаемость рыбы в ходе эксперимента составила 100 %. Результаты кормления представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Результаты кормления ленского осетра и радужной форели комбикормами с гуминовыми веществами

Table 5. Results of feeding sturgeons and rainbow trout with compound feeds containing humic substances

Вариант, комбикорм	Общая масса ± S _x , г		Прирост массы ± S _x , г	Среднесуточный прирост ± S _x , г/сут	Общие затраты корма ± S _x , г	Кормовой коэффициент ± S _x , ед.
	начало кормления	конец кормления				
Ленский осетр, 3 % ввода	1 438,33 ± 6,39	1 561,00 ± 7,232	122,67 ± 0,88	12,27 ± 0,09	194,16 ± 0,86	1,58 ± 0,00
Радужная форель, 3 % ввода	1 575,33 ± 5,17	1 780,70 ± 6,57	205,33 ± 1,86	20,53 ± 0,19	212,65 ± 0,71	1,03 ± 0,01
Ленский осетр (контроль)	2 198,00 ± 2,65	2 304,00 ± 3,46	106,00 ± 1,00	10,60 ± 0,10	296,70 ± 0,37	2,80 ± 0,02
Радужная форель (контроль)	1 304,33 ± 2,33	1 457,67 ± 3,38	153,33 ± 1,20	15,33 ± 0,12	176,07 ± 0,31	1,15 ± 0,01

Обобщая результаты, приведенные в табл. 5, следует отметить, что, несмотря на функциональные изменения печени, комбикорма с гуминовыми веществами способствуют увеличению прироста (для ленского осетра – на 13 %, для радужной форели – на 25,5 %), что обычно нехарактерно для рыб с таким состоянием печени. Форель является быстрорастущей рыбой, особенно по сравнению с осетровыми рыбами, поэтому комбикорм с гуминовыми веществами наиболее

существенно увеличивает темп ее роста. Кроме того, снижаются кормовые коэффициенты: у ленского осетра – на 44 %, у форели – на 10 %. Функциональность разработанных комбикормов проявляется в снижении нагрузки на печень за счет содержащихся в корме гуминовых веществ, что приводит к ускорению темпов роста и снижению кормовых коэффициентов. При кормлении обычными производственными кормами без гуминовых веществ будет наблюдаться только рост кормовых коэффициентов, снижение темпов роста, постепенная гибель рыб.

Результаты, полученные в ходе биохимического анализа тканей радужной форели и ленского осетра (табл. 6), позволяют судить о влиянии гуминовых добавок на качественные показатели продукции.

Таблица 6. Биохимические показатели тела ленского осетра и радужной форели

Table 6. Biochemical parameters of the body of sturgeon and rainbow trout

Образец	Содержание в теле рыбы, %				
	Влажность	Сухое вещество	Белок	Зола	Жирность
Ленский осетр, 3 % кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»	71,40 ± 0,29	28,60 ± 0,29	15,52 ± 0,12	2,98 ± 0,06	10,10 ± 0,23
Ленский осетр (контроль)	71,74 ± 0,31	28,26 ± 0,31	14,63 ± 0,39	3,08 ± 0,06	10,55 ± 0,64
Радужная форель, 3 % кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»	76,63 ± 0,19	23,37 ± 0,19	14,92 ± 0,41	1,83 ± 0,05	6,64 ± 0,17
Радужная форель (контроль)	76,70 ± 0,03	23,40 ± 0,03	14,70 ± 0,07	2,17 ± 0,02	5,44 ± 0,12

Данные, представленные в табл. 6, свидетельствуют о том, что при использовании комбикормов с гуминовыми веществами в теле ленского осетра накапливается на 5,7 % больше белка. У форели, помимо незначительного увеличения содержания белка, наблюдается повышение содержания жира на 18 %, что улучшает потребительские качества мяса.

Состояние печени и ее функциональные показатели оценивали по ИП и содержанию гликогена в печени ленского осетра и радужной форели (табл. 7).

Таблица 7. Индекс печени и гликоген печени ленского осетра и радужной форели

Table 7. Liver index and liver glycogen of sturgeon and rainbow trout

Образец	Индекс печени	Гликоген печени, %
Печень осетра до кормления комбикормами	3,19 ± 0,14	29,18 ± 0,11
Печень осетра после кормления комбикормом с 3 % кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»	2,40 ± 0,20	17,51 ± 0,15
Печень радужной форели до кормления комбикормами	3,66 ± 0,16	17,59 ± 0,13
Печень радужной форели после кормления комбикормом с 3 % кормовой комплексной добавки «ZOO Экобиосфера»	2,69 ± 0,18	7,95 ± 0,12

Приведенные в табл. 7 данные показывают, что использование функциональных комбикормов с гуминовыми веществами при кормлении радужной форели и ленского осетра приводит к снижению содержания гликогена на 9,64 и 11,67 % соответственно. Индекс печени за этот период кормления практически пришел в норму (2,40 и 2,69 при норме 2,0 %).

Для оценки влияния гуминовых веществ в составе комбикорма для осетровых рыб определяли состояние печени по гепатосоматическому индексу и содержание в ней гликогена до кормления и спустя 21 и 29 сут после кормления ленского осетра в производственных условиях. Данные по гепатосоматическому индексу и содержанию гликогена в печени опытной и контрольной групп представлены в табл. 8.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что через 21 сут кормления функциональным комбикормом в опытной группе индекс печени снизился на 30,4 %, количество гликогена – на 6,6 % по сравнению с первоначальной величиной. В контрольной группе в это время отмечается увеличение индекса печени на 6,7 %, гликогена – на 2,8 % по сравнению с первоначальным

Таблица 8. Гепатосоматический индекс и содержание гликогена в печени ленского осетра при кормлении комбикормом с добавлением гуминовых веществ (ОАО «Опытный рыбхоз «Селец»)

Table 8. Hepatosomatic index of the liver and glycogen content in the liver of sturgeon fed with compound feed with the addition of humic substances (OJSC Experimental Fish Farm Selets)

Образец	Индекс печени, %		Содержание гликогена, %	
	опытная группа	контрольная группа	опытная группа	контрольная группа
Печень осетра до кормления	3,36 ± 0,36	3,36 ± 0,36	46,48 ± 2,49	46,48 ± 2,49
Печень осетра через 21 сут кормления	2,34 ± 0,18	3,60 ± 0,12	43,40 ± 1,31	47,82 ± 2,31
Печень осетра через 29 сут кормления	1,54 ± 0,33	2,60 ± 0,11	7,03 ± 0,85	18,11 ± 0,57

состоянием. Обследование через 29 сут показало, что индекс печени снизился в опытной группе на 54,2 %, а содержание гликогена в печени – в 6,6 раза по сравнению с первоначальной величиной. Перевод контрольной группы на функциональный комбикорм также привел к снижению индекса печени на 27,8 %, содержания гликогена на 62,1 % по сравнению с периодом кормления контрольным комбикормом. Таким образом, производственные испытания разработанного комбикорма «Гумокорм» с функциональными свойствами подтвердили его эффективность в отношении устранения функциональных расстройств печени.

Особенности морфологии печени опытных и контрольных особей отражены на рис. 1.

Анализ состояния печени показал различие по группам. Так, печень у рыб контрольной группы плохо держит форму, имеет мажущую консистенцию, белесый цвет. У рыб опытной группы форма печени сохраняется, имеет характерный для здорового органа цвет, не воспалена. По данным ОАО «Опытный рыбхоз «Селец», после восстановления состояния печени кормовые коэффициенты при постоянном использовании добавки «Гумокорм» в течение сезона находились на уровне 1,0 ед., что соответствует лучшим зарубежным аналогам.

Испытания на радужной форели проводили в ОАО «Рыбхоз «Альба» в течение двух декад. Рыбу выращивали в бетонных бассейнах. За первую декаду индивидуальная масса рыбы увеличилась на 18,7 г при средней массе 314 г; общий прирост массы достиг 215 кг при затратах 260 кг комбикорма. Кормовой коэффициент комбикорма был равен 1,2 ед. Во второй декаде выращивания температура воды была 13,2 °С, содержание растворенного в воде кислорода находилось на уровне 6,6 мг/л, рН 7,5. За этот период индивидуальная масса увеличилась на 13 г при средней массе 327 г; общий прирост массы за этот период равнялся 149,6 кг при затратах 180 кг комбикорма. Кормовой коэффициент составил 1,2 ед. Таким образом, за две декады кормления кормовой коэффициент разработанного комбикорма не превысил 1,2 ед.

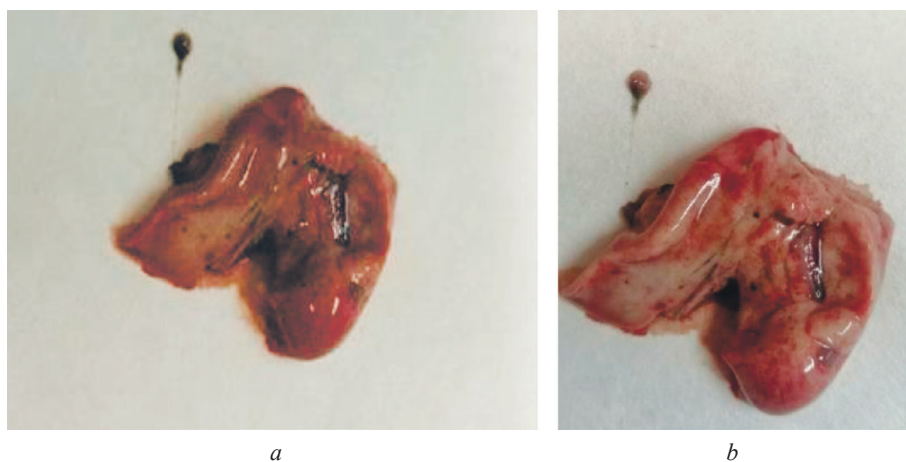


Рис. 1. Внешний вид и состояние внутренних органов ленского осетра: *a* – печень рыбы опытной группы; *b* – печень рыбы контрольной группы

Fig. 1. Appearance and condition of the internal organs of the Lena sturgeon: *a* – liver of fish from the experimental group; *b* – liver of fish from the control group

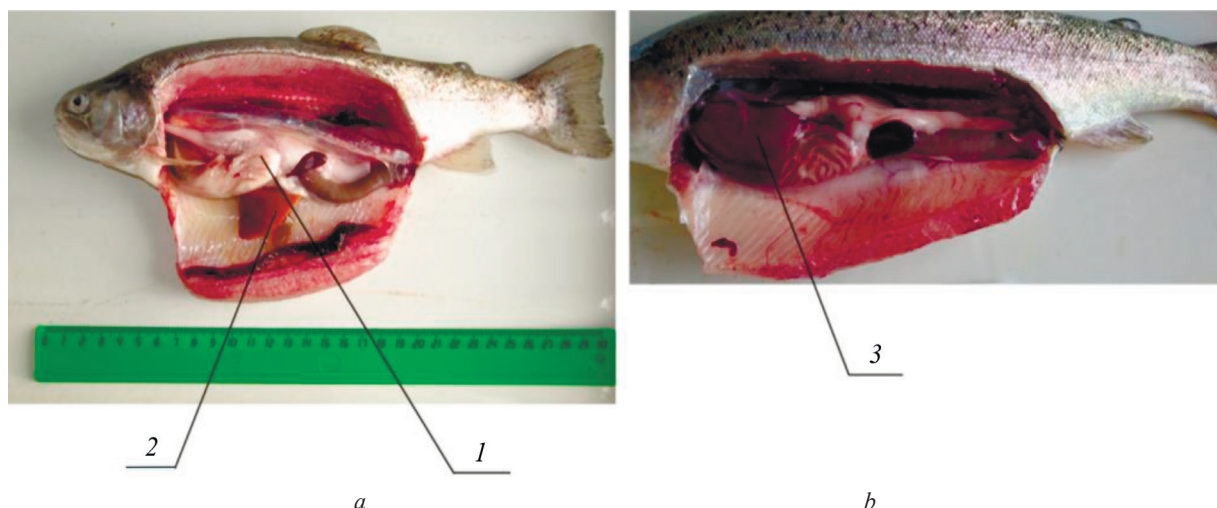


Рис. 2. Внешний вид и состояние внутренних органов радужной форели:
a – при кормлении контрольным комбикормом (*1* – ожирение внутренних органов;
2 – стеатоз (побеление) печени); *b* – при кормлении комбикормом с гуминовыми веществами
(*3* – нормальная пигментация печени)

Fig. 2. External appearance and condition of the internal organs of rainbow trout: *a* – internal organs of rainbow trout fed with control feed (*1* – obesity of internal organs; *2* – whitening of the liver); *b* – internal organs of rainbow trout fed with compound feed containing humic substances (*3* – normal liver color)

На рис. 2 показаны особенности внешнего вида и состояния внутренних органов радужной форели. Видно, что при интенсивном кормлении контрольным комбикормом в течение производственных испытаний наблюдается ухудшение обмена веществ у форели, а именно ожирение внутренних органов, изменение цвета печени, что свидетельствует об ухудшении ее функционального состояния. В то же время при кормлении функциональным комбикормом, содержащим гуминовые вещества, не наблюдается ожирения внутренних органов, а печень имеет нормальный цвет, форму и размер.

Состояние печени радужной форели характеризуется двумя показателями – гепатосоматическим индексом печени и содержанием гликогена в печени (табл. 9).

Таблица 9. Гепатосоматический индекс и содержание гликогена в печени радужной форели

Table 9. Liver index and liver glycogen in rainbow trout

Образец рыбы	Гепатосоматический индекс, %	Содержание гликогена в печени, %
Печень (фон)	3,46	8,50 ± 0,05
Печень (контроль)	4,20	27,85 ± 0,12
Печень (опыт)	1,90	4,22 ± 0,03
Печень (норма)	2,00	2–4

Интерпретация результатов, приведенных в табл. 9, позволяет установить, что при кормлении опытными комбикормами содержание гликогена в печени находится практически в норме. При кормлении контрольным комбикормом (без гуминовых веществ) в течение двух декад содержание гликогена увеличилось в 3,3 раза.

Выводы. В условиях интенсивного развития отечественного рыбководства актуальным направлением становится разработка кормов функционального назначения, адаптированных для ценных видов рыб. РУП «Институт рыбного хозяйства» разработало новые функциональные комбикорма для осетровых и лососевых рыб, направленные на восстановление функций печени. На данные корма утверждены технические условия: ТУ ВУ 100035627.029-2022 (для осетровых рыб) и ТУ ВУ 100035627.026-2020 (для радужной форели).

Разработанные комбикорма предназначены для профилактики и нормализации обменных процессов в организме рыб, в первую очередь в печени. Установлено, что включение данных рационов в кормление осетровых рыб уже на 21-е сутки приводит к снижению индекса печени на 30,4 % и сокращению содержания гликогена на 6,6 % относительно исходных величин. Систематическое использование данных кормов в течение сезона способствует полному восстановлению функционального состояния печени.

Аналогичная динамика зафиксирована у радужной форели: за 20 сут содержание гликогена снизилось на 16,8 %, а индекс печени – на 45,0 %. Опытным путем доказано, что минимальный эффективный период применения составляет 20 сут, однако наилучшие рыбоводно-биологические результаты достигаются при непрерывном кормлении в течение всего сезона.

Благодарности. Данные исследования выполнялись в рамках Государственной программы научных исследований «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2021–2025 годы и Государственной научно-технической программы «Агропромкомплекс», 2021–2025 годы.

Acknowledgments. These studies were conducted within the framework of the following programs: the “State Scientific Research Program Quality and Efficiency of Agricultural Production” 2021–2025 years and the State Scientific and Technical Program “Agroindustrial Complex”, 2021–2025 years.

Список использованных источников

1. Севастьянова, Т. В. Функциональные кормовые добавки для сельскохозяйственных животных и их влияние на показатели продуктивности / Т. В. Севастьянова, Б. В. Уша // *Аграрная наука*. – 2021. – № 347 (4). – С. 99–103. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-347-4-99-103>
2. Щербина, М. А. Кормление рыб в пресноводной аквакультуре / М. А. Щербина, Е. А. Гамыгин. – М.: Изд-во ВНИРО, 2006. – 360 с.
3. Остроумова, И. Н. Биологические основы кормления рыб / И. Н. Остроумова. – СПб.: [б. и.], 2001. – 372 с.
4. Сергеева, Н. Т. Особенности липидного питания радужной форели / Н. Т. Сергеева // *Физиолого-биохимические основы кормления рыб в аквакультуре: сб. науч. тр. / Калинингр. гос. техн. ун-т.* – Калининград, 1995. – С. 4–16.
5. Тютюнников, Б. Н. Химия жиров / Б. Н. Тютюнников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая пром-сть, 1974. – 448 с.
6. Владовская, С. Необходимые добавки к кормам и потребности рыб в них / С. Владовская // *Рыбное хозяйство. Серия: Корма и кормление в аквакультуре: аналит. и реф. информ. / Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-т экономики, информ. и автоматизир. систем упр. рыб. хоз-ва.* – М., 2001. – Вып. 1. – С. 27–32.
7. Абрамова, Ж. И. Исследование процессов окисления липидов в искусственных кормах рыб и сравнительная оценка методов их определения / Ж. И. Абрамова, Н. Е. Картавцева, Л. А. Николаева // *Сборник научных трудов / Гос. науч.-исслед. ин-т озер. и реч. рыб. хоз-ва (ГосНИОРХ).* – Л., 1981. – Вып. 176: Актуальные проблемы кормления рыб в индустриальном рыбоводстве / под ред. И. Н. Остроумовой. – С. 103–116.
8. *Progress in chemistry of fats and other lipids: [in 16 vol.] / ed.: R. T. Holman, W. O. Lundberg, T. Malkin.* – London: Pergamon Press; New York: Academic Press, 1954. – Vol. 2. – 347 p.
9. Дегтярик, С. Болезни – «подводные камни» рыбоводства / С. Дегтярик, О. Марцуйль // *Наука и инновации*. – 2020. – № 3 (205). – С. 24–28. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-3-24-28>
10. Корсаков, К. В. Мировой опыт использования гуминовых кислот в птицеводстве / К. В. Корсаков // *Основы и перспективы органических биотехнологий*. – 2018. – № 3. – С. 3–4.
11. Бузуглова, О. С. Применение гуминовых препаратов в животноводстве (обзор) / О. С. Бузуглова, В. Е. Зинченко // *Достижения науки и техники АПК*. – 2016. – Т. 30, № 2. – С. 89–93.
12. Любимова, Н. А. Гуминовые вещества как компоненты кормовых добавок (обзор) / Н. А. Любимова, Г. Ю. Рабинович // *Достижения науки и техники в АПК*. – 2020. – Т. 34, № 9. – С. 77–84. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10914>
13. Использование добавок на основе гуминовых веществ в кормлении сухостойных коров / А. В. Кветковская, В. Н. Заяц, О. Г. Галушко [и др.] // *Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству.* – Жодино, 2008. – Т. 43, ч. 2. – С. 99–110.
14. Эффективность использования немодифицированных микропористых гуминовых кислот из леонардита в рационе карпа / А. А. Коровушкин, С. А. Нефедова, Ю. В. Якунин, Р. В. Барышев // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*. – 2019. – № 3 (43). – С. 59–63.
15. Гуминовые препараты в составе лечебно-профилактических комбикормов для осетровых рыб / Ж. В. Кошак, Н. Н. Гадлевская, А. Н. Русина [и др.] // *Вопросы рыбного хозяйства Беларуси: сб. науч. тр. / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству, Ин-т рыб. хоз-ва.* – Мн., 2022. – Вып. 37. – С. 341–356. <https://doi.org/10.47612/978-985-880-000000-0-2022-37-341-356>
16. Чухарева, Н. В. Влияние термической обработки торфов на состав и свойства гуминовых кислот / Н. В. Чухарева, Л. В. Шишмина, А. А. Новиков // *Химия твердого топлива*. – 2003. – № 4. – С. 37–43.

17. Balla, D. Solute retention in groundwater table controlled fen area with respect to various land use scenarios / D. Balla, O. Dietrich, J. Quast // *International Peat Journal*. – 2000. – № 10. – P. 33–47.
18. Перспективы применения торфа и продуктов его переработки в животноводстве / Л. В. Касимова, Т. П. Жилкова, Э. В. Титова [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 92 с.
19. Грибан, В. Г. К механизму действия препаратов гумусовой природы на организм животных / В. Г. Грибан // *Органическое вещество торфа: тез. докл. Междунар. симп., Минск, 15–19 мая 1995 г. / Междунар. торф. о-во, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии Акад. наук Беларуси*. – Мн., 1995. – С. 120.

References

1. Sevastyanova T. V., Usha B. V. Functional feed additives for farm animals and their impact on productivity indicators. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*, 2021, no. 347 (4), pp. 99–103 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-347-4-99-103>
2. Shcherbina M. A., Gamygin E. A. *Fish feeding in freshwater aquaculture*. Moscow, Publishing house of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2006. 360 p. (in Russian).
3. Ostroumova I. N. *Biological foundations of fish feeding*. St. Petersburg, 2001. 372 p. (in Russian).
4. Sergeeva N. T. Features of lipid nutrition of rainbow trout. *Fiziologo-biokhimicheskie osnovy kormleniya ryb v akvakul'ture: sbornik nauchnykh trudov* [Physiological and biochemical foundations of fish feeding in aquaculture: collection of scientific papers]. Kaliningrad, 1995, pp. 4–16 (in Russian).
5. Tyutyunnikov B. N. *Chemistry of fats*. 2nd ed. Moscow, Pishcheyaya promyshlennost' Publ., 1974. 448 p. (in Russian).
6. Vladovskaya S. Necessary additives to feed and fish needs for them. *Rybnoe khozyaistvo. Seriya: Korma i kormlenie v akvakul'ture* [Fish Industry. Series: Feed and Feeding in Aquaculture]. Moscow, 2001, iss. 1, pp. 27–32 (in Russian).
7. Abramova Zh. I., Kartavtseva N. E., Nikolaeva L. A. Study of lipid oxidation processes in artificial fish feeds and comparative evaluation of methods for their determination. *Aktual'nye problemy kormleniya ryb v industrial'nom rybovodstve: sbornik nauchnykh trudov* [Actual problems of fish feeding in industrial fish farming: collection of scientific papers]. Leningrad, 1981, iss. 176, pp. 103–116 (in Russian).
8. Holman R. T., Lundberg W. O., Malkin T. (eds.). *Progress in chemistry of fats and other lipids. Vol. 2*. London, Pergamon Press; New York, Academic Press, 1954. 347 p.
9. Dziahtsiaryk S., Martsul O. Diseases are “pitfalls” of fish farming. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2020, no. 3 (205), pp. 24–28 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-3-24-28>
10. Korsakov K. V. World experience of humic acids using in poultry farming. *Osnovy i perspektivy organicheskikh biotekhnologii = Fundamentals and Perspectives of Organic Biotechnologies*, 2018, no. 3, pp. 3–4 (in Russian).
11. Bezuglova O. S., Zinchenko V. E. Application of humic substances in animal husbandry (review). *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 89–93 (in Russian).
12. Lyubimova N. A., Rabinovich G. Yu. Humic substances as components of feed additives (review). *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in the Agro-Industrial Complex*, 2020, vol. 34, no. 9, pp. 77–84 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10914>
13. Kvetkovskaya A. V., Zayats V. N., Golushko O. G., Nadarinskaya M. A., Makarova N. L., Ovtchinnikova T. F., Zhmakova N. A. Usage of supplements of natural origin in dry-grass period for cows. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi: sbornik nauchnykh trudov* [Zootechnical science of Belarus: a collection of scientific papers]. Zhodino, 2008, vol. 43, pt. 2, pp. 99–110 (in Russian).
14. Korovushkin A. A., Nefedova S. A., Yakunin Y. V., Baryshev R. V. Efficiency of use of non-modified microporous humic acids from leonardite in the diet of carp. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva = Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, 2019, no. 3 (43), pp. 59–63 (in Russian).
15. Koshak J. V., Gadlevskaya N. N., Rusina A. N., Zenovich N. V., Rybkina E. E., Kohovich A. G. Humic preparations in the composition of therapeutic and prophylactic feeds for sturgeon fish. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi: sbornik nauchnykh trudov = Belarus fish industry problems: collected transactions*. Minsk, 2021, iss. 37, pp. 341–356 (in Russian). <https://doi.org/10.47612/978-985-880-000000-0-2022-37-341-356>
16. Chukhareva N. V., Shishmina L. V., Novikov A. A. Effect of thermal treatment of peats on composition and properties of humic acids. *Solid Fuel Chemistry*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 36–42.
17. Balla D., Dietrich O., Quast J. Solute retention in groundwater table controlled fen area with respect to various land use scenarios. *International Peat Journal*, 2000, no. 10, pp. 33–47.
18. Kasimova L. V., Zhilyakova T. P., Titova E. V., Panov A. N., Udintsev S. N., Sibagatov V. A., Belousov N. M. *Prospects for the use of peat and its processing products in animal husbandry*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2006. 92 p. (in Russian).
19. Griban V. G. Dealing with the mechanism of humic origin preparations cation upon animal organism. *Organicheskoe veshchestvo torfa: tezisy dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 15–19 maya 1995 g. = Peat organic matter: theses of papers International Symposium, Minsk, May 15–19, 1995*. Minsk, 1995, p. 120 (in Russian).

Информация об авторах

Кошак Жанна Викторовна – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией кормов, Институт рыбного хозяйства, Национальная академия наук Беларуси (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Koshak.zn@Gmail.com

Дегтярик Светлана Михайловна – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией болезней рыб, Институт рыбного хозяйства, Национальная академия наук Беларуси (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lavrushnek@mail.ru

Денисов Данил Николаевич – генеральный директор Научно-производственного центра «Экобиосфера» (ул. 2-я Привокзальная, 30а, 249340, Калужская обл., Жиздра, Российская Федерация). E-mail: info@ecobio.pro

Information about authors

Zhanna V. Koshak – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Mixfeed, Fish Industry Institute, National Academy of Sciences of Belarus (22, Stebeneva St., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Koshak.zn@Gmail.com

Sviatlana M. Degtyarik – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory of Fish Diseases, Fish Industry Institute, National Academy of Sciences of Belarus (22, Stebeneva St., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lavrushnek@mail.ru

Danil N. Denisov – General Director of the Scientific and Production Center “Ecobiosphere” (30a, 2nd Privokzalnaya St., 249340, Zhizdra, Kaluga Region, Russian Federation). E-mail: info@ecobio.pro

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.333–189.2:631.82
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025

В. В. Азаренко¹, А. А. Жешко²

¹*Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь*

**К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ ВЫСОКОТОЧНЫХ МАШИН ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Аннотация. Современные технические средства для внесения минеральных удобрений должны обеспечивать высокое качество их распределения по поверхности поля. В значительной степени неравномерность распределения зависит от типа применяемых распределяющих рабочих органов. Высокую точность распределения обеспечивают штанговые разбрасыватели, однако для стабильной их работы необходимо, чтобы осуществлялась равномерная дозированная подача удобрений транспортирующими устройствами из накопительных емкостей к распределяющим рабочим органам. Для центробежных разбрасывателей равномерная подача удобрений к дискам также является важнейшей задачей. Рациональные геометрические параметры накопительных емкостей сводят к минимуму вероятность образования сводов и зависания удобрений, а также обуславливают производительность машинно-тракторных агрегатов при выполнении технологических операций по внесению средств химизации земледелия. Объем накопительных емкостей также является важнейшим параметром, предопределяющим технико-экономическую эффективность процесса внесения удобрений. С одной стороны, компактные навесные разбрасыватели грузоподъемностью 0,4–1,5 т характеризуются высокой маневренностью и низкой материалоемкостью, однако в процессе внесения требуют значительного количества технологических остановок для дозагрузки новыми порциями удобрений, что является причиной снижения их производительности. В этой связи навесные штанговые разбрасыватели целесообразно использовать для внесения подкормочных доз удобрений. Полуприцепные разбрасыватели грузоподъемностью 5 т и более производительны при внесении основных доз удобрений на крупных по площади участках, однако их применение не всегда оправдано на небольших полях со значительным количеством препятствий. Рассмотрены особенности конструкций технологических емкостей, применяемых на современных высокоточных технических средствах для внесения минеральных удобрений, представлены аналитические зависимости для определения основных конструктивных параметров рассматриваемых и подобных технических средств.

Ключевые слова: распределение удобрений, накопительные емкости, боковое давление, коррозионная активность, объем, образование сводов, поперечное сечение, подвижность удобрений

Для цитирования: Азаренко, В. В. К вопросу обоснования конструктивных параметров накопительных емкостей высокоточных машин для внесения минеральных удобрений / В. В. Азаренко, А. А. Жешко // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 153–164. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Vladimir V. Azarenko¹, Aliaksandr A. Zheshka²

¹*Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Republic of Belarus*

**ON THE ISSUE OF SUBSTANTIATING THE DESIGN PARAMETERS OF STORAGE TANKS
OF HIGH-PRECISION MACHINES FOR APPLYING MINERAL FERTILIZERS**

Abstract. Modern technical means for applying mineral fertilizers should ensure high quality of their distribution over the field surface. To a large extent, the uneven distribution depends on the type of distributing working bodies used. High distribution accuracy is provided by rod spreaders. However, for their stable operation, it is necessary that uniform metered

fertilizer supply is carried out by transporting devices from storage tanks to distributing working bodies. For centrifugal spreaders, the uniform supply of fertilizers to the discs is also an important task. Rational geometric parameters of storage tanks minimize the likelihood of arches forming and fertilizers hanging, and also determine the productivity of machine and tractor units when performing technological operations to introduce chemicals for agriculture. The capacity of storage tanks is also an important parameter that determines the technical and economic efficiency of the fertilizer application process. On the one hand, compact mounted spreaders with a lifting capacity of 0.4–1.5 tons are characterized by high maneuverability and low material consumption. However, during application, they require a significant number of technological stops to reload new portions of fertilizers, which is the reason for a decrease in their productivity. In this regard, it is advisable to use mounted rod spreaders for applying fertilizing doses of fertilizers. Semi-trailer spreaders with a load capacity of 5 tons or more are suitable for applying basic doses of fertilizers in large areas, but their use is not always justified in small fields with a large number of obstacles. Consider the design features of technological tanks used on modern, high-precision technical means for applying mineral fertilizers, and presents analytical dependencies for determining their main design parameters.

Keywords: fertilizer distribution, storage tanks, lateral pressure, corrosion activity, capacity, arch formation, cross section, mobility of fertilizers

For citation: Azarenko V. V., Zheshka A. A. On the issue of substantiating the design parameters of storage tanks of high-precision machines for applying mineral fertilizers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 153–164 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Введение. Накопительная емкость большинства современных технических средств для внесения твердых минеральных удобрений изготавливается в виде сварной конструкции, состоящей из выполненного из профильного металла каркаса и обшивки из листовой стали. Цилиндрические емкости машин для внесения жидких удобрений производят из листового материала, толщина которого может достигать 5 мм и более в случае, если в накопительной емкости в процессе работы создается избыточное давление.

Необходимо учитывать, что годовая загрузка машин для внесения удобрений превышает аналогичный показатель для другой сельскохозяйственной техники, в то же время в процессе эксплуатации накопительные емкости и другие рабочие органы разбрасывателей удобрений взаимодействуют с агрессивными средами, что может являться причиной преждевременного выхода из строя машин. По коррозионной активности минеральные удобрения делят на три группы [1, с. 132; 2, с. 28; 3, с. 147]:

- низкой активности – мочевины;
- средней – суперфосфат, аммиачная селитра;
- высокой – нитроаммофоска и сульфат аммония.

По этой причине для изготовления емкостей машин для внесения удобрений в настоящее время все чаще используют в качестве материала пластмассы, а также защитные покрытия для бункеров из металлов. Срок службы элементов машин для внесения удобрений в большей мере зависит от глубины коррозионных воздействий – питтингов, которые являются локальными очагами разрушения металлических элементов конструкции бункеров.

Для исключения зависания удобрений и образования сводов накопительные емкости должны иметь обоснованную геометрическую форму, обеспечивающую высокую подвижность сыпучих материалов. Для последующего расчета подающих и распределяющих рабочих органов необходимо определить давление, которое создают удобрения на стенки и дно накопительных емкостей. По этой причине обоснование основных конструктивных параметров накопительных емкостей современных технических средств для высокоточного внесения удобрений является актуальной задачей.

Цель работы – на основе анализа конструкций современных технических средств для высокоточного внесения твердых минеральных удобрений определить наиболее перспективные формы накопительных емкостей и определить их рациональные конструктивные параметры.

Материалы и методы исследований. Механизированная загрузка и выгрузка удобрений из бункера должна протекать без образования «мертвых зон», в которых происходит скопление сыпучего материала без дальнейшего продвижения под действием собственного веса к подающим и распределяющим устройствам [4–6]. Образование «мертвых зон» характерно для твердых минеральных удобрений в случае недостаточного угла наклона боковых, задней или передней сте-

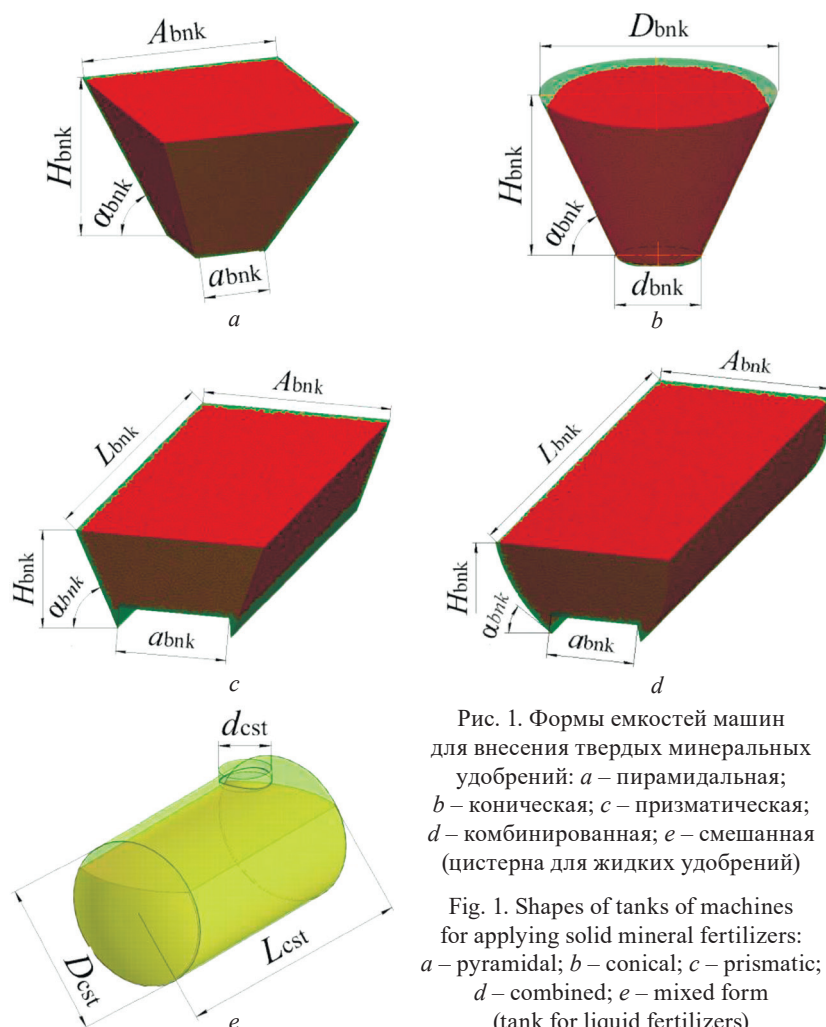


Рис. 1. Формы емкостей машин для внесения твердых минеральных удобрений: *a* – пирамидальная; *b* – коническая; *c* – призматическая; *d* – комбинированная; *e* – смешанная (цистерна для жидких удобрений)

Fig. 1. Shapes of tanks of machines for applying solid mineral fertilizers: *a* – pyramidal; *b* – conical; *c* – prismatic; *d* – combined; *e* – mixed form (tank for liquid fertilizers)

нок к горизонту. Также форма и геометрические параметры накопительных емкостей должны исключать образование сводов при движении удобрений к подающим и дозирующим устройствам.

Наиболее характерные формы бункеров машин для внесения твердых и жидких минеральных удобрений представлены на рис. 1. Форма бункеров для внесения твердых минеральных удобрений может быть сферической, призматической, конической, пирамидальной или смешанной¹ [7, 8; 9, с. 24–34; 10, с. 8–10].

Геометрические параметры бункеров машин для внесения твердых минеральных удобрений должны приниматься в соответствии со следующими требованиями:

- размеры A_{bnk} , L_{bnk} , D_{bnk} – обеспечивают беспрепятственное заполнение бункера твердыми минеральными удобрениями при использовании механического погрузчика;
- размеры a_{bnk} , H_{bnk} – исключают образование сводов при внесении удобрений;
- угол α_{bnk} – обеспечивает стекание удобрений под действием собственного веса к подающим или дозирующим рабочим органам без образования «мертвых зон».

Для вычисления объема пирамидальной накопительной емкости следует использовать формулу для нахождения объема усеченной пирамиды

$$V_{\text{bnk}}^{\text{pir}} = \frac{1}{3} H_{\text{bnk}} \left(A_{\text{bnk}}^2 + \sqrt{A_{\text{bnk}}^2 a_{\text{bnk}}^2} + a_{\text{bnk}}^2 \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{pir}}$ – объем пирамидальной накопительной емкости, м³; A_{bnk} , a_{bnk} – соответственно длина верхней и нижней стороны основания, м; H_{bnk} – высота бункера, м.

¹ Цыбуленко П. В., Березовский Н. И. Машины и оборудование обогатительных и перерабатывающих производств: метод. пособие по практ. занятиям. Мн.: БНТУ, 2013. 32 с.

Для призматической формы бункера получим

$$V_{\text{bnk}}^{\text{prz}} = \frac{1}{3} H_{\text{bnk}} \left(A_{\text{bnk}} L_{\text{bnk}} + \sqrt{A_{\text{bnk}} L_{\text{bnk}} a_{\text{bnk}} l_{\text{bnk}} + a_{\text{bnk}} l_{\text{bnk}}} \right), \quad (2)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{prz}}$ – объем призматической накопительной емкости, м³; L_{bnk} , l_{bnk} – длина верхней и нижней части бункера, м.

Объем конического бункера определим как объем усеченного конуса:

$$V_{\text{bnk}}^{\text{con}} = \frac{1}{12} H_{\text{bnk}} \left(D_{\text{bnk}}^2 + D_{\text{bnk}}^2 d_{\text{bnk}}^2 + d_{\text{bnk}}^2 \right) = \frac{\pi \tan \alpha_{\text{bnk}}}{24} \left(D_{\text{bnk}}^2 - D_{\text{bnk}}^3 \right), \quad (3)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{con}}$ – объем конической накопительной емкости, м³; D_{bnk} , d_{bnk} – соответственно диаметр верхнего и нижнего основания, м; α_{bnk} – угол наклона образующей конуса, град.

Для комбинированной формы накопительной емкости A_{bnk} является хордой основания (см. рис. 1); при известной высоте H_{bnk} определим радиус основания (R_{bnk}) по формуле

$$R_{\text{bnk}} = \frac{H_{\text{bnk}}}{2} + \frac{A_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}}, \quad (4)$$

тогда объем комбинированной накопительной емкости ($V_{\text{bnk}}^{\text{cor}}$) определим как

$$\begin{aligned} V_{\text{bnk}}^{\text{cor}} &= L_{\text{bnk}} \frac{\left(\frac{A_{\text{bnk}}^2 + 4H_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}} \right)^2 \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{2R_{\text{bnk}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{2R_{\text{bnk}}} \right) \right)}{2} = \\ &= L_{\text{bnk}} \frac{\left(\frac{A_{\text{bnk}}^2 + 4H_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}} \right)^2 \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{H_{\text{bnk}} + \frac{A_{\text{bnk}}}{4H_{\text{bnk}}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{H_{\text{bnk}} + \frac{A_{\text{bnk}}}{4H_{\text{bnk}}}} \right) \right)}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения объема цистерны для жидких удобрений, представленной на рис. 1, е, необходимо найти объем цилиндрической части и объем двух усеченных шарообразных заглушек. Объем цилиндрической части составит

$$V_{\text{cst}}^{\text{cil}} = \frac{\pi D_{\text{cst}}^2}{4} (L_{\text{cst}} - 2h_{\text{ceg}}), \quad (6)$$

где $V_{\text{cst}}^{\text{cil}}$ – объем цилиндрической части, м³; L_{cst} , D_{cst} – длина и диаметр цистерны соответственно, м; h_{ceg} – длина усеченных шарообразных заглушек, м.

Объем усеченной шарообразной заглушки ($V_{\text{cst}}^{\text{ceg}}$) определим по формуле

$$\begin{aligned} V_{\text{cst}}^{\text{ceg}} &= \pi \int_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} \left(\sqrt{R_{\text{ceg}}^2 - x^2} \right)^2 dx = \pi \int_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} \left(R_{\text{ceg}}^2 - x^2 \right)^2 dx = \\ &= \pi \left(R_{\text{ceg}}^2 x - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} = \pi \left[R_{\text{ceg}}^2 h_{\text{ceg}} - \frac{R_{\text{ceg}}^3}{3} + \frac{(R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})^3}{3} \right] = \\ &= \pi \left(R_{\text{ceg}} h_{\text{ceg}}^2 - \frac{h_{\text{ceg}}^3}{3} \right) = \frac{\pi h_{\text{ceg}}^2 (3R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})}{3}, \end{aligned} \quad (7)$$

где R_{ceg} – радиус шарообразного сегмента, м.

С учетом формул (6) и (7) для определения объема цистерны (V_{cst}) получим следующее выражение:

$$V_{\text{cst}} = V_{\text{cst}}^{\text{cil}} + 2V_{\text{cst}}^{\text{ceg}} = \frac{\pi D_{\text{cst}}^2}{4} (L_{\text{cst}} - 2h_{\text{ceg}}) + \frac{\pi h_{\text{ceg}}^2 (3R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})}{6}. \quad (8)$$

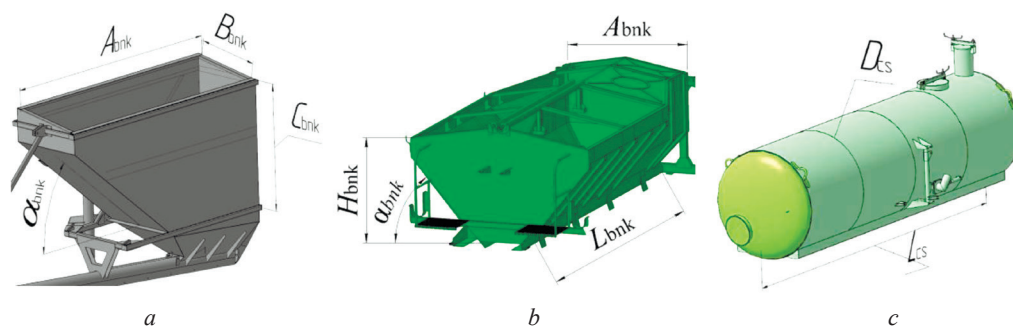


Рис. 2. Геометрические параметры накопительных емкостей машин для внесения минеральных удобрений: *a* – РШУ-18; *b* – МШВУ-18; *c* – МПВУ-16

Fig. 2. Geometric parameters of storage tanks of machines for applying mineral fertilizers: *a* – RShU-18; *b* – MShVU-18; *c* – MPVU-16

Для навесных и полунавесных разбрасывателей твердых минеральных удобрений, как правило, применяют кузова конической и пирамидальной формы [11; 12, с. 14–16; 13, с. 763; 14]. Например, в настоящее время выпускаются разбрасыватели грузоподъемностью до 500 кг с конической формой бункера, такие как STRUMYK S-300, D-POL 500L, Jar-Met 500L и др. [15, с. 555; 16–19], и с призматической формой, состоящие из двух пирамидальных отсеков, – РУ-1000, РУ-1600, РУ-3000 и др. Также пирамидальный бункер применен на машине штанговой для внесения твердых минеральных удобрений РШУ-18 (рис. 2, *a*). Для полуприцепных разбрасывателей грузоподъемностью более 4 т, таких как МТТ-4У, РУ-7000-1, РУ-8, МШХ-9, характерны емкости призматической и комбинированной форм; данный тип бункера применяется на машинах МШВУ-18 (рис. 2, *b*), МХС-10 и др. На машинах для внесения жидких органических и минеральных удобрений, например МПВУ-16 (рис. 2, *c*), применяются емкости – цистерны [20, 21].

Технологический расчет конструктивных элементов накопительных емкостей сводится к определению вертикального давления на дно и бокового давления на стенки.

Важнейшей характеристикой, позволяющей судить о характере движения удобрений в бункере, является гидравлический радиус, который представляет собой отношение площади поперечного сечения емкости к смоченному периметру этого сечения:

$$R_{\text{gudb}} = \frac{S_{\text{udb}}}{P_{\text{udb}}} = \frac{S_{\text{udb}}}{2a_{\text{udb}} + b_{\text{udb}}}, \quad (9)$$

где R_{gudb} – гидравлический радиус, м; S_{udb} – площадь поперечного сечения емкости минеральных удобрений, м²; P_{udb} – смоченный периметр поперечного сечения емкости минеральных удобрений, м; a_{udb} , b_{udb} – соответственно длина боковой и нижней стенок, соприкасающихся со слоем удобрений, м.

Согласно исследованиям [3, с. 153] для средних по глубине накопительных емкостей при соблюдении условия

$$3R_{\text{gudb}} < H_{\text{udb}} < 8R_{\text{gudb}}, \quad (10)$$

где H_{udb} – высота слоя удобрений в бункере, м, величина подвижности удобрений в бункере учитывается коэффициентом подвижности удобрений в бункере, который вычисляется по формуле

$$m_{\text{pdv}} = \frac{1 - \sin \varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}}{1 + \sin \varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}} = 1 + 2f_{\text{vnt}}^2 - 2f_{\text{vnt}} \sqrt{1 + f_{\text{vnt}}^2}, \quad (11)$$

где m_{pdv} – коэффициент подвижности удобрений в бункере; $\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}$, f_{vnt} – угол и коэффициент внутреннего трения удобрений соответственно.

Далее определим боковое и вертикального давление на стенки и дно накопительной емкости. В процессе внесения удобрений в накопительных емкостях возникают динамические нагрузки в результате различных сотрясений, которые необходимо учитывать при вычислении давления

на стенки и дно емкостей. Значения данного коэффициента для полуприцепных и навесных разбрасывателей находятся в пределах $k_{\text{dnm}} = 1,6-1,8$.

Также при вычислении давления на стенки и дно накопительных емкостей необходимо учитывать возможные зависания твердых минеральных удобрений. Значение коэффициента зависания зависит от гидравлического радиуса, высоты слоя материала в бункере, коэффициента трения удобрений о стенки и других факторов и определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{udb}} = \frac{R_{\text{gudb}}}{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}}} \right) = \frac{R_{\text{gudb}} - R_{\text{gudb}}e^{-\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}}}{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}, \quad (12)$$

где ε_{udb} – коэффициент зависания удобрений в бункере; H_{udb} – глубина погружения рассчитываемой площадки (высота слоя удобрений в накопительной емкости), м; k_{frc} – коэффициент внешнего трения удобрений о стенки накопительной емкости.

Вертикальное давление на дно бункера (P_{dnv}) определим как произведение высоты слоя материала, плотности (с соответствующим обозначением кг/м³) удобрений, коэффициента зависания и динамичности. С учетом формулы (12) его значение определим как

$$P_{\text{dnv}} = gH_{\text{udb}}\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}\varepsilon_{\text{udb}} = \frac{\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}} \left(R_{\text{gudb}} - R_{\text{gudb}}e^{-\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}} \right)}{k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}. \quad (13)$$

Выражение для определения вертикального давления на дно накопительной емкости (P_{vrt}) запишем в виде

$$P_{\text{vrt}} = \frac{\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right) e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}{R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right)} - 1}}{k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}. \quad (14)$$

Боковое давление на вертикальную стенку накопительной емкости (P_{bkv}) определим по формуле

$$P_{\text{bkv}} = gH_{\text{udb}}\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}\varepsilon_{\text{udb}}m_{\text{pdv}} = \frac{g\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}R_{\text{gudb}} \left(e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}{R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right)} - 1 \right)}{k_{\text{frc}}}. \quad (15)$$

На рис. 3 представлена графическая интерпретация результатов расчета давления минеральных удобрений различных видов (аммиачная селитра $\gamma_{\text{udb1}} = 823,5$ кг/м³, карбамид $\gamma_{\text{udb2}} = 774,6$ кг/м³, суперфосфат двойной $\gamma_{\text{udb3}} = 1\,086,6$ кг/м³, хлористый калий $\gamma_{\text{udb4}} = 1\,070,5$ кг/м³) на боковую вертикальную стенку и дно бункера машины РШУ-18. Среднее значение внутреннего угла трения удобрений принято $\varphi_{\text{ubd}}^{\text{vnt}} = 30^\circ$, коэффициент динамичности $k_{\text{dnm}} = 1,7$, значение гидравлического радиуса R_{gudb} для бункера разбрасывателя РШУ-18, в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 3, составляет

$$R_{\text{gudb}} = \frac{S_{\text{udb}}}{a_{\text{udb}} + b_{\text{ubd}} + H_{\text{udb}}} = \frac{0,95}{3,02} = 0,3. \quad (16)$$

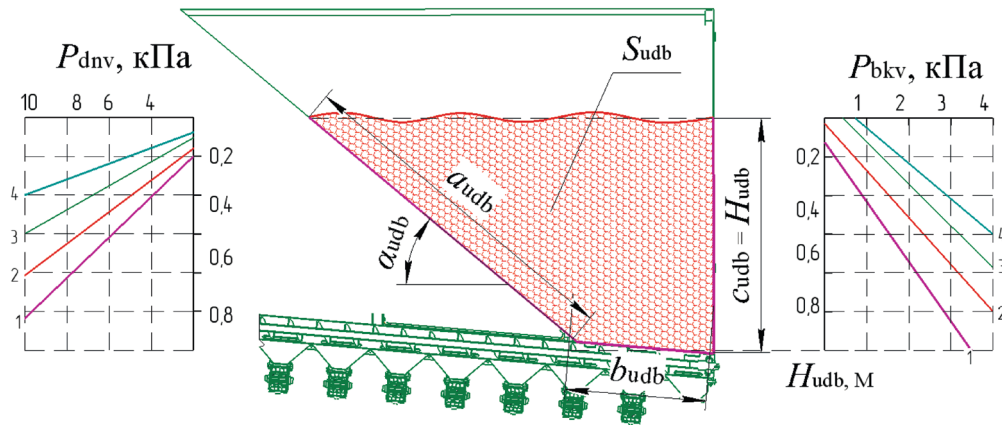


Рис. 3. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления на стенки и дно накопительной емкости пирамидальной формы: 1 – суперфосфат двойной; 2 – хлористый калий; 3 – аммиачная селитра; 4 – карбамид

Fig. 3. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure on the walls and bottom of a pyramidal storage tank: 1 – double superphosphate; 2 – potassium chloride; 3 – ammonium nitrate; 4 – carbamide

Боковое давление на наклонную стенку накопительной емкости (P_{nkl}), установленную под углом $\alpha_{удб}$ к горизонту, определим по формуле

$$P_{nkl} = H_{удб} \gamma_{удб} k_{dnm} \varepsilon_{удб} \left(\cos^2 \alpha_{удб} + m_{pdv} \sin^2 \alpha_{удб} \right) =$$

$$= \frac{g \gamma_{удб} k_{dnm} R_{гудб} \left(\sin^2(\alpha_{удб}) \sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + \cos^2(\alpha_{удб}) \sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + 1 \right) \left(e^{\frac{H_{удб} k_{frc} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) - 1)}{R_{гудб} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + 1)}} - 1 \right)}{k_{frc} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) - 1)} \quad (17)$$

где $\gamma_{удб}$ – плотность удобрений, кг/м³; k_{dnm} – динамический коэффициент.

На рис. 4 представлена расчетная схема для определения бокового давления на стенки, расположенные под углом $\alpha_{удб} = 50^\circ$. Для машины штанговой для внесения удобрений $S_{удб} = 1,77 \text{ м}^2$, а значение смоченного периметра $2a_{удб} + b_{удб} = 3,57 \text{ м}$, значение гидравлического радиуса составляет $R_{гудб} = 0,49 \text{ м}$.

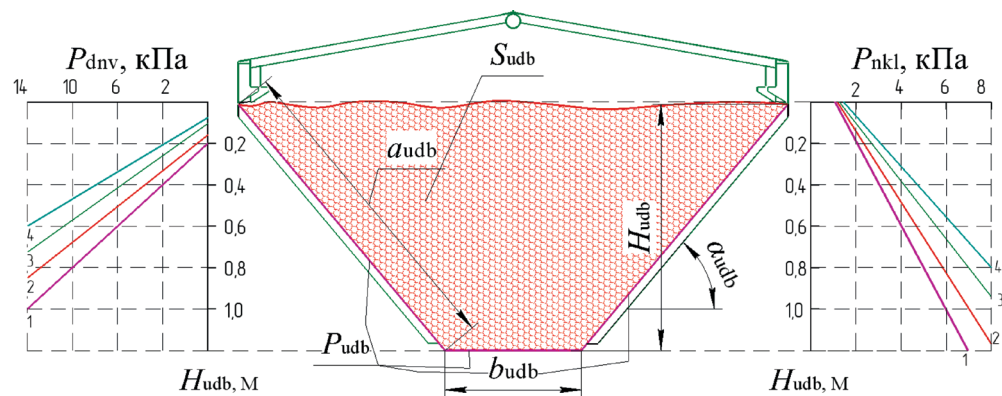


Рис. 4. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления на стенки и дно накопительной емкости призматической формы: 1 – суперфосфат двойной; 2 – хлористый калий; 3 – аммиачная селитра; 4 – карбамид

Fig. 4. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure on the walls and bottom of a prismatic storage tank: 1 – double superphosphate; 2 – potassium chloride; 3 – ammonium nitrate; 4 – carbamide

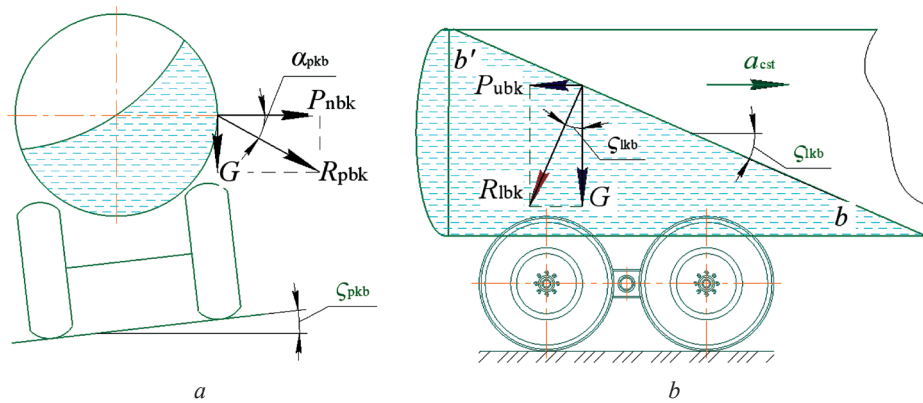


Рис. 5. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления в цистерне:
 а – наезд на препятствие; б – ускорение и замедление

Fig. 5. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure in a tank:
 a – hitting an obstacle; b – acceleration and deceleration

Согласно результатам, представленным на рис. 3 и 4, давление на дно накопительных емкостей для твердых минеральных удобрений более чем в два раза превышает давление на вертикальные и наклонные боковые стенки бункеров.

В процессе внесения жидких минеральных удобрений происходят колебания в результате обработки закругленных участков, при работе на склонах и по причине наезда на неровности поля [23, с. 10–13]. При этом жидкие минеральные удобрения набегают на стенку накопительной емкости, что является причиной возникновения бокового давления (рис. 5, а). Кроме того, при внесении жидких удобрений на рабочем участке оператор переключает передачи, что приводит к ускорению или замедлению, в результате жидкость набегает на заднюю или переднюю стенку накопительной емкости (рис. 5, б).

Колебательные процессы могут являться причиной неравномерного распределения удобрений в результате колебания адаптеров для поверхностного внесения шлангами-понижителями или модулей для внутрпочвенного внесения. Для снижения данных негативных воздействий в конструкции навесной системы адаптеров должно быть предусмотрено наличие демпфирующих устройств.

Для нахождения силы бокового давления определим объем, занимаемый жидкими удобрениями в зависимости от их уровня в накопительной емкости. В соответствии со схемой, представленной на рис. 6, запишем формулу для определения площади поперечного сечения, занимаемого жидкими удобрениями:

$$S_{ACD} = S_{ADCB} - S_{ADB},$$

площадь сектора ADCB определим по формуле

$$S_{ADCB} = \alpha_{trv} R_{cst}^2 = R_{cst}^2 \arccos \left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}} \right), \tag{18}$$

где α_{trv} – угол между вертикалью и точкой на пересечении уровня жидкости и цистерны, град; R_{cst} – радиус цистерны, м; h_{cst} – высота уровня удобрений в цистерне, м.

Для нахождения площади равнобедренного треугольника ABC запишем

$$S_{ABC} = \frac{L_{trv} (R_{cst} - h_{cst})}{2} = (R_{cst} - h_{cst}) \sqrt{R_{cst}^2 - (R_{cst} - h_{cst})^2} = (R_{cst} - h_{cst}) \sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2}, \tag{19}$$

где S_{ABC} – площадь равнобедренного треугольника ABC, м²; L_{trv} – длина основания равнобедренного треугольника ABC, м.

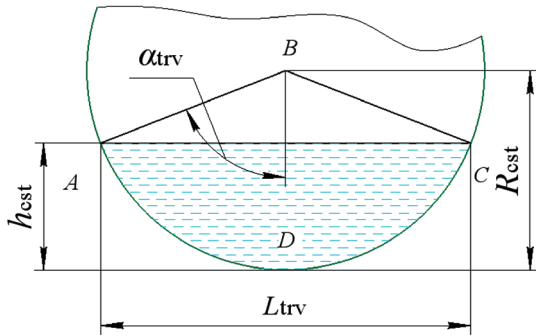


Рис. 6. Расчетная схема для определения объема, занимаемого жидкими удобрениями

Fig. 6. Calculation scheme for determining the volume occupied by liquid fertilizers

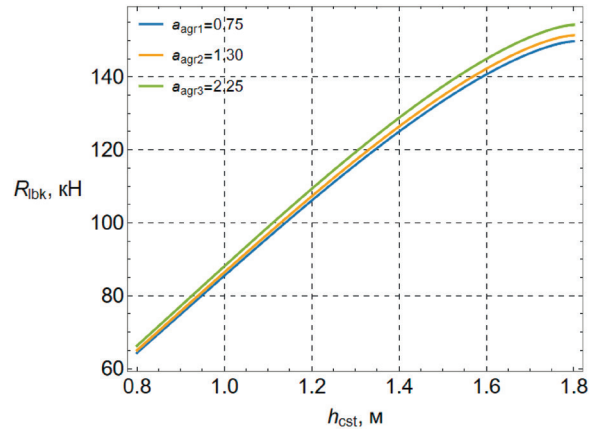


Рис. 7. Зависимость величины силы бокового давления от уровня жидких удобрений в цистерне

Fig. 7. Dependence of the lateral pressure force on the level of liquid fertilizers in the tank

Тогда площадь сегмента BCD определим как

$$S_{BCD} = R_{cst}^2 \arccos\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) - (R_{cst} - h_{cst})\sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2}. \quad (20)$$

Объем, занимаемый жидкими удобрениями, определим как

$$V_{BCD} = S_{BCD}L_{cst}, \quad (21)$$

где V_{BCD} – объем, занимаемый жидкими удобрениями, m^3 ; L_{cst} – длина накопительной емкости, м.

Тогда масса жидких минеральных удобрений определится как

$$m_{BCD} = \rho_{udbl} \left(R_{cst}^2 \arccos\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) - (R_{cst} - h_{cst})\sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2} \right), \quad (22)$$

где m_{BCD} – масса жидких минеральных удобрений, кг; ρ_{udbl} – плотность жидких минеральных удобрений, kg/m^3 .

Тогда сила бокового давления составит

$$R_{lbk} = \sqrt{(ma_{agr})^2 + (mg)^2} = \sqrt{L_{cst}\rho_{udbl} \left(a_{agr}^2 + g^2 \right) \left(R_{cst}^2 \cos^{-1}\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) + \sqrt{-h_{cst}(h_{cst} - 2R_{cst})(h - R)} \right)^2}, \quad (23)$$

где R_{lbk} – сила бокового давления, кН; a_{agr} – ускорение (замедление) машинно-тракторного агрегата, m/c^2 .

На рис. 6 отображена расчетная схема для определения объема, занимаемого жидкими удобрениями. Зависимость значения силы бокового давления от уровня жидких минеральных удобрений в накопительной емкости для машины МПВУ-16, для которой $R_{cst} = 0,9$ м, $L_{cst} = 6$ м, $\rho_{udb} = 997$ kg/m^3 , представлена на рис. 7. Как видно из рисунка, в процессе работы машины для внесения жидких органических удобрений подвергаются существенным воздействиям, которые необходимо снижать за счет применения перегородок внутри емкости, а также демпферных устройств для адаптеров.

Заключение. В статье представлены аналитические зависимости для определения рациональных параметров накопительных емкостей современных технических средств для высокоточного внесения твердых минеральных удобрений. Полученные результаты использованы при расчете конструкций машины штанговой для внесения удобрений МШВУ-18, навесного разбрасывателя для внесения подкормочных доз твердых минеральных удобрений РШУ-18 и машины для поверхностного и внутрипочвенного внесения жидких удобрений МПВУ-16 и могут быть применены для разработки аналогичных технических средств различного типоразмера.

Список использованных источников

1. Степук, Л. Я. Недобор и потери урожая как следствие наличия проблем в сфере технического обеспечения сельского хозяйства / Л. Я. Степук, В. Р. Петровец, И. В. Барановский // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 132–136.
2. Степук, Л. Я. Доказательства необходимости разработки и реализации государственной научно-технической программы приоритетного сельхозмашиностроения / Л. Я. Степук // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (Минск, 20–21 окт. 2022 г.) / НАН Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2022. – С. 27–33.
3. Догановский, М. Г. Машины для внесения удобрений: конструкция, теория, расчет и испытания / М. Г. Догановский, Е. В. Козловский. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
4. Исследование влияния параметров питающих устройств на качество внесения минеральных удобрений / К. П. Андреев, В. А. Макаров, Б. А. Нефедов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2017. – № 4 (36). – С. 82–86.
5. Бричагина, А. А. Движение семян и гранул минеральных удобрений в бункере сеялки / А. А. Бричагина, В. К. Евтеев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 7 (45). – С. 64–66.
6. Дёмин, С. Б. Моделирование влияния параметров бункера и транспортных окон на производительность бункера сеялок / С. Б. Дёмин, Д. В. Синёнков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – № 4 (39). – С. 46–53. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-39-4-47-53>
7. Аль-Аббас Амер. Изучение рабочих параметров машин для внесения твердых минеральных удобрений / Аль-Аббас Амер // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 6. – С. 170–174.
8. Зернов, Е. В. Математическая модель процесса истечения сыпучего материала из бункеров / Е. В. Зернов, А. М. Моисеенко // Вестник ОрелГАУ. – 2006. – № 2–3. – С. 94–95.
9. Мурадова, С. Ш. Воздействие сыпучих материалов на стенки щелевых бункеров / С. Ш. Мурадова, Л. В. Федосеева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Т. 44, № 3. – С. 24–38. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-24-38>
10. Андреев, К. П. Разработка и обоснование параметров рабочих органов самозагружающейся машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Андреев Константин Петрович; Рязан. гос. агротехнол. ун-т. – Рязань, 2017. – 17 с.
11. Шварц, А. А. Стабилизация пространственного положения кузовного низкорамного разбрасывателя удобрений / А. А. Шварц, Б. П. Беседин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 7. – С. 73–76.
12. Лютых, О. Обзор рынка опрыскивателей и разбрасывателей удобрений // АгроФорум. – 2020. – № 2. – С. 12–21.
13. Raei, R. Morphological attributes and phytochemical compounds of *Satureja hortensis* L. in response to poultry pellet and zinc sulphate applications / R. Raei, V. Akbarpour, M. A. Bahmanyar // Journal of Horticultural Sciences. – 2023. – Vol. 36, № 4. – P. 763–776. <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.67877.1006>
14. Experimental and numerical research of granular manure fertilizer application by centrifugal fertilizer spreading / E. Jotautiene, V. Bivainis, R. Mieldazys [et al.] // Proceedings of the 21st international scientific conference “Engineering for rural development”, Jelgava, Latvia, 25–27 May 2022 / Latvia Univ. of Life Sciences a. Technologies. – Jelgava, 2022. – P. 295–299. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF088>
15. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation / X. Wang, W. Liu, Z. Li [et al.] // Pedosphere. – 2020. – Vol. 30, № 4. – P. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60457-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60457-0)
16. Rutkoviene, V. Nitrogen losses from organic and mineral fertilizers in model soil system / V. Rutkoviene, L. Cesoniene, D. Steponavicius // Cereal Research Communications. – 2007. – Vol. 35, № 2. – P. 313–316. <https://doi.org/10.1556/CRC.35.2007.2.37>
17. Investigation of natural magnesium mineral fertilizer granulation and determination of granule qualitative indicators / A. Jasinskas, J. Pekarskas, V. Kucinskas, A. Aboltins // 15th international scientific conference “Engineering for rural development”, Jelgava, Latvia, 25–27 May, 2016 / Latvia Univ. of Agriculture; ed.: L. Malinovska, V. Osadcuks. – Jelgava, 2016. – P. 647–652.
18. Experimental study of disc fertilizer spreader performance / A. Przywara, F. Santoro, A. Kraszkievicz [et al.] // Agriculture. – 2020. – Vol. 10, № 10. – Art. 467. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100467>
19. Reumers, J. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: a parameter study / J. Reumers, E. Tjjskens, H. Ramon // Biosystems Engineering. – 2003. – Vol. 86, № 3. – P. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.004>
20. Design of a sieve bucket spreading mechanism based on EDEM / Z. Liping, Z. Weiqiang, Z. Lixin, L. Yulong // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2019. – Vol. 12, № 3. – P. 84–90. <https://doi.org/10.25103/jestr.123.12>
21. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader / P. Van Liedekerke, E. Tjjskens, E. Dintwa [et al.] // Powder Technology. – 2009. – Vol. 190, № 3. – P. 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.018>
22. Оценка сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных колебаниях кузова / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, О. И. Мироненко, А. В. Зяблов // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 3. – С. 10–13. https://doi.org/10.53883/20749325_2021_03_10

References

1. Stepuk L. Ia., Petrovets V. R., Baranovskii I. V. Shortage and losses of yield as consequence of problems in the sphere of technical support of agriculture. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2017, no. 2, pp. 132–136 (in Russian).
2. Stepuk L. Ia. Evidence of the need to develop and implement a state scientific and technical program for priority agricultural machinery engineering. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhoziaistvennom proizvodstve: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu obrazovaniya RUP "NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khoziaistva" (Minsk, 20–21 oktyabrya 2022 g.)* [Scientific and technological progress in agricultural production: proceedings of the international scientific and technical conference dedicated to the 75th anniversary of the establishment of the Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization" (Minsk, October 20–21, 2022)]. Minsk, 2022, pp. 27–33 (in Russian).
3. Doganovskii M. G., Kozlovskii E. V. *Fertilizer application machines: design, theory, calculation and testing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 272 p. (in Russian).
4. Andreev K. P., Makarov V. A., Nefedov B. A., Uglanov M. B., Kostenko M. Yu. Investigation of the influence of parameters of nutrition devices on the quality of mineral fertilizers introduction. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva = Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, 2017, no. 4 (36), pp. 82–86 (in Russian).
5. Brichagina A. A., Evteev V. K. Movement of seeds and mineral fertilizer granules in a seed drill hopper. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2008, no. 7 (45), pp. 64–66 (in Russian).
6. Demin S. B., Sinenkov D. V. Modelling of influence of parameters of the bunker and transport windows on productivity of the bunker of seeders. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2015, no. 4 (39), pp. 46–53 (in Russian). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-39-4-47-53>
7. Al-Aabbas Amer. Studying the operating parameters of solid mineral fertilizer application machines. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2011, no. 6, pp. 170–174 (in Russian).
8. Zernov E. V., Moiseenko A. M. Mathematical model of the process of bulk material discharge from bunkers. *Vestnik OrelGAU*, 2006, no. 2–3, pp. 94–95 (in Russian).
9. Muradova S. Sh., Fedoseeva L. V. Impact of loose materials on track hopper walls. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 24–38 (in Russian). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-24-38>
10. Andreev K. P. *Development and justification of the parameters of the working bodies of a self-loading machine for surface application of solid mineral fertilizers*. Riazan, 2017. 17 p. (in Russian).
11. Shwartz A. A., Besedin B. P. The stabilization of low-built fertilizing spreaders attitude position. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2016, no. 7, pp. 73–76 (in Russian).
12. Lyutykh O. Overview of the market for sprayers and fertilizer spreaders. *AgroForum*, 2020, no. 2, pp. 12–21 (in Russian).
13. Raei R., Akbarpour V., Bahmanyar M. A. Morphological attributes and phytochemical compounds of *Satureja hortensis* L. in response to poultry pellet and zinc sulphate applications. *Journal of Horticultural Sciences*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 763–776 (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.67877.1006>
14. Jotautiene E., Bivainis V., Mieldazys R., Gaudutis A., Jasinskas A. Experimental and numerical research of granular manure fertilizer application by centrifugal fertilizer spreading. *Proceedings of the 21st international scientific conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, 25–27 May 2022*. Jelgava, 2022, pp. 295–299. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF088>
15. Wang X., Liu W., Li Z., Teng Y., Christie P., Luo Y. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation. *Pedosphere*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60457-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60457-0)
16. Rutkoviene V., Cesoniene L., Steponavicius D. Nitrogen losses from organic and mineral fertilizers in model soil system. *Cereal Research Communications*, 2007, vol. 35, no. 2, pp. 313–316. <https://doi.org/10.1556/CRC.35.2007.2.37>
17. Jasinskas A., Pekarskas J., Kucinskas V., Aboltins A. Investigation of natural magnesium mineral fertilizer granulation and determination of granule qualitative indicators. *15th international scientific conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, 25–27 May, 2016*. Jelgava, 2016, pp. 647–652.
18. Przywara A., Santoro F., Kraszkiewicz A., Pecyna A., Pascuzzi S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 10, art. 467. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100467>
19. Reumers J., Tijssens E., Ramon H. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: a parameter study. *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 86, no. 3, pp. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.004>
20. Liping Z., Weiqiang Z., Lixin Z., Yulong L. Design of a sieve bucket spreading mechanism based on EDEM. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 84–90. <https://doi.org/10.25103/jestr.123.12>

21. Van Liedekerke P., Tijssens E., Dintwa E., Rioual F., Vangeyte J., Ramon H. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. *Powder Technology*, 2009, vol. 190, no. 3, pp. 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.018>

22. Gromakov M. S., Bepal'ko S. V., Mironenko O. I., Zyablov A. V. Estimation of liquid pressure forces on the tank boiler side at bogie frame swaying. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2021, no. 3, pp. 10–13 (in Russian). https://doi.org/10.53883/20749325_2021_03_10

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент Национальной академии наук, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь Отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.basnet.by

Жешко Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-5956-8974>. E-mail: azeshko@gmail.com

Information about the authors

Vladimir V. Azarenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary of the Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.bas-net.by

Aliaksandr A. Zheshka – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin St., 220049, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-5956-8974>. E-mail: azeshko@gmail.com

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS

UDC 664.849-492:635.621
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-165-176>

Поступила в редакцию 18.11.2025
Received 18.11.2025

Evgeny D. Rozhnov, Marina N. Shkolnikova, Olga N. Musina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

**KINETICS AND MECHANISM OF CAROTENOID DEGRADATION
IN PUMPKIN POWDER: EFFECT OF STORAGE TEMPERATURE
AND PACKAGING ATMOSPHERE**

Abstract. Carotenoids are highly susceptible to oxidative and thermal degradation, which compromises the nutritional and functional quality of plant-based food powders. This study aimed to establish the kinetic parameters governing carotenoid degradation in enzyme-hydrolyzed pumpkin powder under varying storage temperatures (4, 20, and 30 °C) and gas atmospheres (vacuum, nitrogen, carbon dioxide, and ambient air). Carotenoid content was monitored spectrophotometrically over 12 months, and degradation kinetics were modeled using first-order reaction kinetics and the Arrhenius equation. The degradation process followed first-order kinetics in all conditions ($R^2 > 0.998$). Oxygen presence dramatically accelerated carotenoid loss: degradation rate constants in air were 2.4–5.1 times higher than in inert or vacuum environments. Activation energies (E_a) were significantly higher in oxygen-free systems (48.8–59.4 kJ/mol) compared to air (41.4 kJ/mol), indicating a shift from oxidation-driven to thermally driven degradation mechanisms. Based on the kinetic models, shelf life (defined as 20 % carotenoid loss) was predicted across temperature – atmosphere combinations. For cold-chain storage (0–4 °C), nitrogen or CO₂ packaging provided the longest shelf life (~20 months), whereas vacuum packaging proved superior under temperature abuse (e.g., 30 °C), extending shelf life to ~13 months versus 2.5–7.5 months in air. The practical significance of this work lies in providing a scientific basis for packaging selection: vacuum packaging is recommended for long-term storage, especially with the risk of temperature fluctuations, while packaging under a nitrogen or carbon dioxide atmosphere is optimal for guaranteed cold chain storage.

Keywords: carotenoids, degradation kinetics, Arrhenius equation, modified atmosphere packaging, pumpkin powder, shelf life

For citation: Rozhnov E. D., Shkolnikova M. N., Musina O. N. Kinetics and mechanism of carotenoid degradation in pumpkin powder: effect of storage temperature and packaging atmosphere. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 165–176. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-165-176>

Е. Д. Рожнов, М. Н. Школьников, О. Н. Мусина

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Барнаул, Российская Федерация*

**КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ КАРОТИНОИДОВ В ТЫКВЕННОМ ПОРОШКЕ:
РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА УПАКОВОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ**

Аннотация. Каротиноиды обладают высокой чувствительностью к окислению и термическому разложению, что ограничивает их стабильность в пищевых порошках растительного происхождения. Целью настоящего исследования являлось установление кинетических закономерностей и параметров деградации каротиноидов в порошке ферментализованного тыквенного пюре при различных температурах хранения (+4, +20 и +30 °C) и газовых средах (вакуум, азот, диоксид углерода и воздух). Содержание каротиноидов отслеживали спектрофотометрически в течение 12 мес. Установлено, что во всех условиях деградация подчиняется кинетике первого порядка ($R^2 > 0,998$). Показано, что наличие кислорода является ключевым фактором окисления: константы скорости деградации в воздухе в 2,4–5,1 раза превышали аналогичные показатели в инертных средах. Энергия активации в инертных атмосферах (48,8–59,4 кДж/моль) оказалась выше, чем в воздухе (41,4 кДж/моль), что указывает на смену механизма деградации

с окислительного на термический при удалении кислорода. На основе полученных моделей рассчитаны сроки годности тыквенного порошка (потеря $\leq 20\%$ каротиноидов): при холодовом хранении ($0...+4\text{ }^\circ\text{C}$) предпочтительна упаковка в атмосфере азота или CO_2 (срок ~ 20 мес.), тогда как при возможных температурных отклонениях (до $+30\text{ }^\circ\text{C}$) наиболее эффективна вакуумная упаковка (~ 13 мес. против $9,5\text{--}11,0$ мес. в инертных средах). Упаковка в воздушной среде не рекомендована: при холодовом хранении срок годности $\leq 7,5$ мес., а при комнатной температуре $\sim 2,5$ мес. Практическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора упаковки: для длительного хранения с риском температурных колебаний рекомендована вакуумная упаковка, а для гарантированного холодового хранения – упаковка в атмосфере азота или диоксида углерода.

Ключевые слова: каротиноиды, кинетика деградации, уравнение Аррениуса, модифицированная газовая среда, тыквенный порошок, срок годности

Для цитирования: Рожнов, Е. Д. Кинетика и механизм деградации каротиноидов в тыквенном порошке: роль температуры и состава упаковочной атмосферы / Е. Д. Рожнов, М. Н. Школьникова, О. Н. Мусина // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 165–176. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-165-176>

Introduction. Carotenoids constitute a large group of natural pigments responsible for the yellow, orange, and red coloration of many fruits and vegetables. Beyond their contribution to organoleptic appeal, they exhibit significant biological activity, serving as provitamin A compounds (e.g., β -carotene, α -carotene) and as potent antioxidants (e.g., lycopene, lutein, zeaxanthin) capable of neutralizing free radicals and reducing the risk of oxidative stress-related diseases. However, their chemical structure – characterized by a long chain of conjugated double bonds – renders them highly susceptible to various degradation factors.

Temperature is one of the most significant and universal influences on carotenoid stability. Elevated temperatures accelerate the kinetics of all chemical reactions leading to degradation, including oxidation, isomerization, and thermal decomposition. The impact of thermal processing and pasteurization on carotenoid retention is complex. On the one hand, heat treatment (e.g., blanching, pasteurization) inactivates enzymes such as lipoxygenase and peroxidase, which catalyze the oxidation of both carotenoids and lipids [1, 2]. This protective effect is corroborated by Guerra-Vargas et al. [3], who reported enhanced carotenoid retention in canned pickled peppers and carrots following pasteurization. On the other hand, high temperatures can induce isomerization of the biologically active *trans*-isomers into less active *cis*-forms and promote direct thermal degradation. The kinetics of such thermal degradation, which follows the Arrhenius model, have been thoroughly described in studies by Lin and Chen [4] and Jirasatid et al. [5]. Low-temperature storage (e.g., freezing or refrigeration) is the most effective strategy for slowing carotenoid degradation. D'yakov and Belinska [6] demonstrated high carotenoid retention in quick-frozen pulpy juices; however, even freezing cannot completely halt degradation processes [7]. In contrast, elevated storage temperatures (e.g., room temperature) dramatically intensify all degradation pathways [8–10].

Oxygen is the primary catalyst of oxidative carotenoid degradation – an autocatalytic process initiated by free radical formation. Two main oxidation pathways have been identified:

(i) direct attack of molecular oxygen on the conjugated double bonds of carotenoids, leading to bond cleavage and the formation of epoxides, apocarotenals, and other low-molecular-weight compounds, resulting in loss of color and biological activity [7, 11];

(ii) lipid-mediated oxidation: Since carotenoids often coexist with lipids in plant matrices, lipid oxidation – catalyzed by light, heat, or metal ions – generates hydroperoxides and free radicals that subsequently attack carotenoid molecules, significantly accelerating their degradation [1, 12]. Nikolaeva [1] explicitly linked lipid oxidation in mechanically damaged carrots to carotenoid loss.

Light, particularly its ultraviolet and blue spectral components, acts as a powerful pro-oxidant. Photons provide the energy required to initiate photooxidation and photoisomerization reactions. Atencio et al. [13] highlighted the extreme photosensitivity of carotenoids in beverages. Consequently, protection from light (opaque packaging or dark storage) is essential to minimize losses [4, 13].

Product moisture content and, more critically, water activity (A_w) also profoundly influence carotenoid stability by determining the physical state of the system and the mobility of reactants. High A_w values, typical of liquid and semi-liquid systems, such as juices and purées, facilitate the diffusion of oxygen

and pro-oxidants, thereby accelerating oxidative reactions. Significant carotenoid losses in tomato and pumpkin purées during storage have been reported [14, 15]. In contrast, low A_w values characteristic of dried powders generally enhance stability. However, in such systems, other factors become dominant: high surface area, direct oxygen exposure, and oxidation risk. Macura et al. [16] and Regier et al. [17] compared drying methods for carrots and concluded that freeze-drying (lyophilization) is less detrimental to carotenoids than hot-air drying, due to reduced thermal stress and oxidation. Tang and Chen [7] emphasized the critical importance of hermetic packaging to shield carotenoids from oxygen.

Acidic conditions promote acid-catalyzed hydrolysis and isomerization of carotenoids. Guerra-Vargas et al. [3] investigated the effect of acetic acid in brine on carotenoid stability, demonstrating that this factor must be considered in conjunction with others. Conversely, the presence of protective compounds – such as ascorbic acid, tocopherols, and phenolic substances – can shield carotenoids by scavenging free radicals. Samoylov et al. [18] demonstrated the stabilizing effect of antioxidants in paprika extract syrups, while Nguyen et al. [19] confirmed the protective role of ascorbic acid in pumpkin purée.

Ensuring carotenoid retention during food processing and *storage* remains a critical challenge for the food industry and food science. The physical factors described above underpin key technological operations used in the processing of carotenoid-rich plant materials (Table 1).

Table 1. Effect of processing technology on carotenoid retention in plant materials

Processing technology	Primary impact	Effect on carotenoids	References
Pasteurization / Sterilization	Heating; inactivation of enzymes and pathogenic/undesirable microorganisms	Dual effect: enzyme inactivation vs. thermal degradation and isomerization	[3, 4]
Hot-air drying	Water removal, heating, oxygen exposure	Significant degradation: oxidation, isomerization, high losses	[11, 17, 20]
Freeze-drying (lyophilization)	Water removal under vacuum at low temperatures	High retention: minimal thermal and oxidative damage	[7, 16]
Freezing	Rapid cooling; suppression of chemical and enzymatic reactions	Very high retention, provided rapid freezing is applied	[6]
HPP (High-pressure processing)	Inactivation of microorganisms and enzymes without heating	Optimal retention / enhanced extractability	[14, 21]

Generally, these factors do not act in isolation but form a complex network of interactions, wherein a change in one parameter inevitably affects the intensity of others. Below, we examine the most significant interrelationships among these factors.

Temperature ↔ Oxygen: Elevated temperature not only directly accelerates oxidation, but also reduces oxygen solubility in liquid matrices while simultaneously increasing the diffusional mobility of oxygen molecules. Overall, this markedly intensifies oxidative degradation. In particular, in dry powders, high temperature accelerates the reaction with atmospheric oxygen [7].

Temperature ↔ Moisture: During high-temperature drying (e.g., hot-air drying), the product is simultaneously exposed to two stressors (heat and oxygen) across a large surface area. This leads to substantial losses: As water is removed, the product matrix undergoes structural changes, and carotenoids become more susceptible to oxidation by atmospheric oxygen due to the disappearance of the protective aqueous phase [11, 20]. In contrast, freeze-drying – avoiding high-temperature exposure – better preserves carotenoids, though the final product still requires protection from oxygen [16, 17].

Light ↔ Oxygen: This is a classic synergistic pair. Light provides the energy required for initiation, while oxygen serves as the substrate for photooxidation reactions. Beverages or purées packaged in transparent containers and exposed to light degrade many times faster than identical products stored in darkness [13].

Product matrix ↔ All factors: The native biochemical matrix of the raw material determines the intensity of all carotenoid degradation processes. In intact plant cells, carotenoids are stabilized within chromoplasts and are often associated with proteins or lipids, which provides natural protection. However, mechanical damage during cutting, grinding, or peeling disrupts cellular compartments, facilitates oxygen access, and activates enzymes (e.g., lipoxygenases, peroxidases) that trigger oxidation. Study [1] clearly

demonstrates how mechanical injury to carrots accelerates lipid oxidation, which directly correlates with carotenoid loss. Carotenoid stability also varies by cultivar, as shown in works [22, 23].

Homogenized systems (purées, pulpy juices, pastes) are characterized by complete disruption of cellular structure, leading to carotenoid release and exposure to oxygen and enzymes. Carotenoid stability in such matrices strongly depends on the presence of lipids, which can act either as pro-oxidants (when oxidized) or as a protective medium that enhances carotenoid solubilization. Additionally, pH is a key factor: for example, carotenoid degradation in tomato purée (pH \approx 4.2) may proceed differently than in pumpkin purée, which has a near-neutral pH [2]. Furthermore, studies on pumpkin purée [19, 24] indicate that carotenoid stability is directly linked to the product's rheological properties and composition.

Aqueous dispersions and emulsions (juices, beverages) represent one of the least favorable environments for hydrophobic carotenoids. In the aqueous phase, they are prone to oxidation and isomerization. Stabilization typically requires the formation of colloidal systems (e.g., emulsions using emulsifiers) or the application of microencapsulation techniques. Study [13] focuses on the stability of pumpkin carotenoids in a light-sensitive beverage, where photooxidation becomes the primary degradation pathway.

Carotenoids are highly soluble in lipids, and in the absence of oxygen, a lipid medium can effectively protect them. However, in the presence of oxygen, lipids readily undergo oxidation, generating free radicals that attack carotenoid molecules. Thus, stability in oil-based systems depends on the degree of unsaturation of the oil and the presence of antioxidants.

Dried products, such as powders from carrots or pumpkins, are generally considered more stable because water removal slows many chemical reactions. Nevertheless, specific surface area and porosity play a crucial role in determining oxidation rates. Studies [7, 16, 25, 26] thoroughly examine the degradation kinetics of carotenoids in powders during storage.

The addition of other ingredients can either stabilize or destabilize carotenoids. For instance, incorporating Japanese quince and strawberry into pumpkin purée [27] may introduce additional acids and phenolic compounds that influence stability. Ascorbic acid added to pumpkin purée has demonstrated effective stabilizing properties [19].

The aim of this study was to establish the kinetic patterns and parameters of thermal and oxidative degradation of carotenoids in enzyme-hydrolyzed pumpkin powder as influenced by storage temperature and packaging atmosphere composition, thereby providing a scientific basis for selecting optimal storage conditions and packaging types.

The following specific *objectives* were addressed:

- to evaluate the effect of packaging atmosphere on carotenoid retention in pumpkin powder in the absence of light;
- to assess the impact of temperature on carotenoid stability in enzyme-hydrolyzed pumpkin powder;
- to analyze experimental kinetic data and develop mathematical models accurately describing carotenoid degradation under the studied conditions.

Materials and Methods. The experimental *material* was enzyme-hydrolyzed pumpkin powder, prepared according to the method previously described by the authors [28]. Native pumpkin purée was obtained by homogenizing the pulp of *Cucurbita pepo* “Rossiyanka” cultivar. Enzymolysis was carried out under the following conditions: the native purée was heated to (70 ± 2) °C, after which an aqueous solution (water-to-enzyme ratio 10 : 1) of a multi-enzyme preparation containing Amylorizin and Protozyme was added under constant stirring. The mixture was then incubated at 70 °C with continuous agitation for 60 minutes. The enzyme-hydrolyzed purée was dried in a 5–7 mm layer in a vacuum drying oven (Labtex LT-VO/50, Russia) at 60–80 °C until the final moisture content did not exceed 5 %. The dried product was standardized by particle size using a ball mill and a universal laboratory sieve shaker (RL-1 MT, Russia). The maximum allowable particle size was 0.25 mm. The milled fractions were thoroughly homogenized to ensure compositional uniformity across all experimental samples. The final moisture content of the powder prior to packaging was (4.4 ± 0.2) %. The visual appearance of pumpkin purée at different stages of the technological process is shown in Figure 1.

Design of the experiment. The study examined the effect of 4 packaging atmospheres on carotenoid retention: vacuum (residual pressure \leq 5 mbar), nitrogen (N_2), carbon dioxide (CO_2), air atmosphere (control, \sim 21 % O_2).

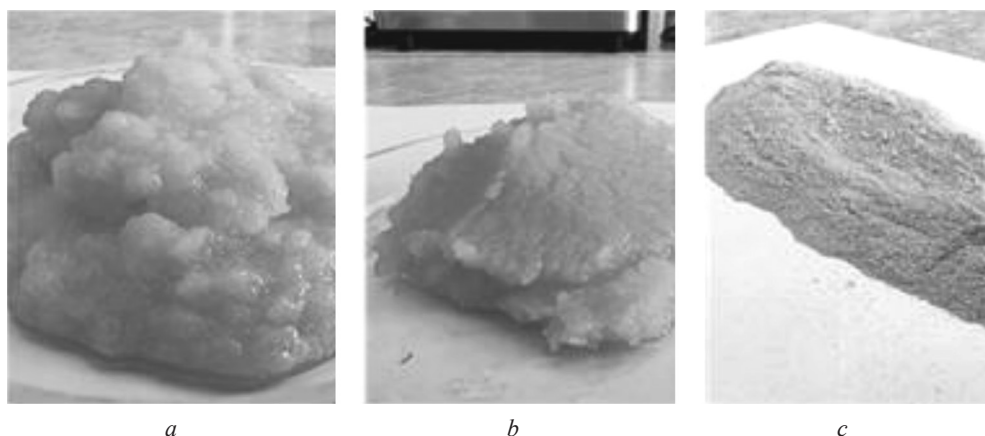


Figure 1. Visual appearance of pumpkin purée samples: *a* – purée after homogenization; *b* – purée after enzymolysis; *c* – purée after drying

Three storage temperature regimes were the following:

- refrigerated storage at 4 °C,
- standard room-temperature storage at 20 °C (climatic chamber KS-200 SPU, Smolensk SPU Scientific & Production Association, Russia),
- elevated-temperature (stress) storage at 30 °C (thermostatic chamber TS-1/80 SPU, Smolensk SPU Scientific & Production Association, Russia).

The total storage duration was 12 months. Samples were withdrawn for analysis at 1, 2, 3, 6, 9, and 12 months. Each combination of experimental factors was performed in triplicate.

A precisely weighed portion (20.0 ± 0.1 g) of enzyme-hydrolyzed pumpkin powder was placed into individual barrier-type heat-sealable aluminum-laminated pouches. Vacuum packaging was performed using a CASO FastVAC 1200 vacuum sealer (China). Modified atmosphere packaging (MAP) was achieved by evacuating the pouch, then flushing with the respective gas (N_2 or CO_2) through a gas inlet tube, followed by re-evacuation. This gas-flush cycle was repeated 10 times to ensure complete atmosphere replacement. After the final gas flush, pouches were heat-sealed without vacuum. Control samples (air atmosphere) were sealed without evacuation or gas flushing.

The moisture content prior to packaging was determined according to GOST 28561-90 “Fruit and vegetable products. Methods for determination of dry matter or moisture”. The carotenoids content was measured in accordance with GOST ISO 6558-2-2019 “Fruit, vegetables and derived products. Determination of carotene content by spectrophotometric method”, using a Shimadzu UV-1800 single-beam scanning spectrophotometer (Japan).

Data analysis. Statistical analysis was performed using three-way ANOVA to assess the significance of the effects of packaging atmosphere, storage temperature, and time on carotenoid retention. Differences between mean values were considered statistically significant at $p < 0.05$. Linear regression equations and graphical data visualization were generated using Microsoft Office Excel (Microsoft, USA). Statistical processing was carried out with Statistica 10.0 software (StatSoft, USA).

Results and Discussion. The initial carotenoid content in the dried enzyme-hydrolyzed pumpkin powder was 185.6 mg/100 g. For food systems, the most probable degradation pathway for such components is a first-order reaction. This hypothesis is fully supported by the linear dependence of the experimental data in the coordinates $[\ln(C) - t]$, which are conventionally used to describe first-order reaction kinetics (Figure 2).

Analysis of the resulting linear dependencies allowed determination of the reaction rate constants (k), obtained as the slopes of the regression lines (Table 2). It was established that, across all studied packaging atmospheres, carotenoid degradation kinetics followed a first-order model (coefficient of determination $R^2 > 0.998$ for all linear fits).

Analysis of the rate constants reveals that inert atmospheres significantly retard carotenoid degradation compared to air. At 4 °C, the degradation rate constant under vacuum was 2.4 times lower than in air;

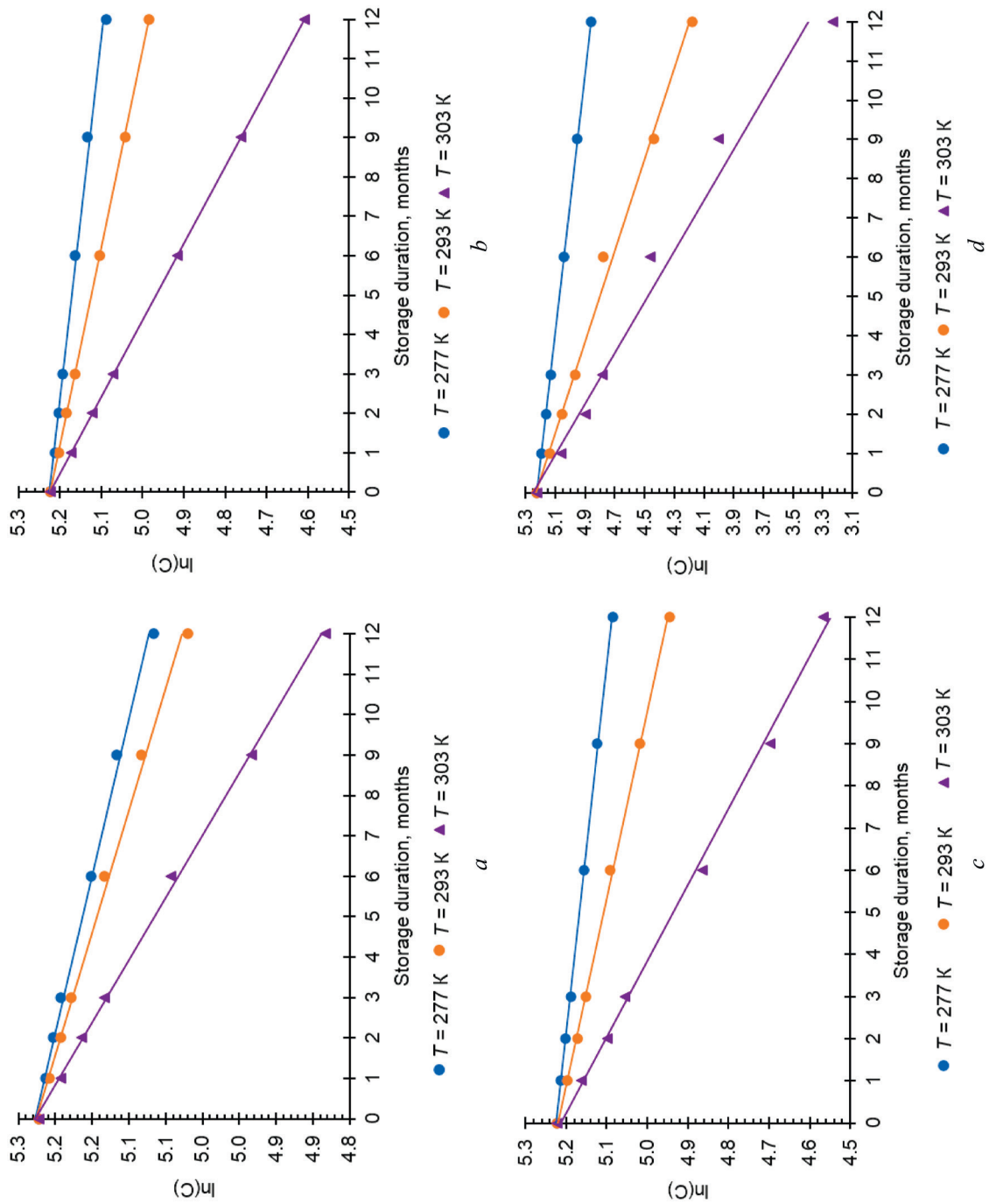


Figure 2. Kinetic experimental data: a – storage under vacuum; b – storage in N_2 atmosphere; c – storage in CO_2 atmosphere; d – storage in ambient air

Table 2. Results of experimental data processing

Packaging atmosphere	Temperature, K	Linear regression equation	R ²	k, month ⁻¹
Vacuum	277	$y = -0.0128x + 5.2227$	0.9987	0.0128
	293	$y = -0.0171x + 5.2216$	0.9995	0.0171
	303	$y = -0.0332x + 5.2218$	0.9989	0.0332
N ₂	277	$y = -0.0114x + 5.2223$	0.9986	0.0114
	293	$y = -0.0201x + 5.2216$	0.9993	0.0201
	303	$y = -0.0519x + 5.2219$	0.9984	0.0519
CO ₂	277	$y = -0.0118x + 5.2217$	0.9989	0.0118
	293	$y = -0.0234x + 5.2219$	0.9995	0.0234
	303	$y = -0.0554x + 5.2239$	0.9982	0.0554
Air	277	$y = -0.0305x + 5.2229$	0.9995	0.0305
	293	$y = -0.0888x + 5.2239$	0.9992	0.0888
	303	$y = -0.1679x + 5.2239$	0.9989	0.1679

Table 3. Calculated values of activation energy (E_a) and pre-exponential factor (A) for Arrhenius equations

Packaging atmosphere	E_a , kJ/mol	A, month ⁻¹
Vacuum	48.83	2.00×10^7
N ₂	59.36	1.71×10^9
CO ₂	58.49	1.13×10^9
Air	41.41	1.18×10^6

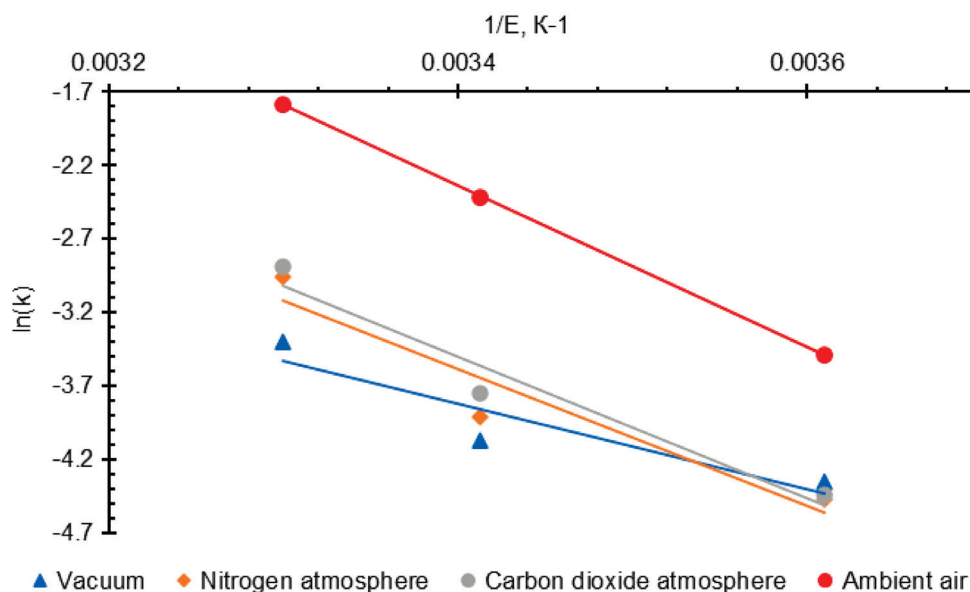


Figure 3. Arrhenius plots

in nitrogen and carbon dioxide, it was 2.7 and 2.6 times lower, respectively. At the highest tested temperature (30 °C), the rate constants in vacuum, nitrogen, and CO₂ were 5.1, 3.2, and 3.0 times lower than in air, respectively.

Table 3 presents the calculated values of activation energy (E_a) and the pre-exponential factor (A) for the Arrhenius equation.

Arrhenius plots were subsequently constructed based on the experimental data (Figure 3).

Analysis of the E_a values in Table 3 allows several key conclusions. The relatively high activation energies for samples stored under vacuum or in inert gas atmospheres indicate that the reaction rate in these conditions is strongly temperature-dependent. In the absence of oxygen, carotenoid degradation

proceeds primarily via thermal decomposition. In contrast, the lower E_a value for the air atmosphere (41.41 kJ/mol) suggests that degradation is less sensitive to temperature and is instead limited by oxygen availability – since oxygen concentration remains constant and in excess in sealed packages, the process is characteristic of oxidation-limited kinetics.

A comparison of nitrogen and carbon dioxide atmospheres shows very similar rate constants and activation energies. The minor differences fall within experimental error, indicating that both gases are equally effective as protective inert atmospheres for enzyme-hydrolyzed pumpkin powder.

Using the derived Arrhenius parameters and the classical first-order kinetic equation, the shelf life of the pumpkin powder was calculated under the criterion of no more than 20 % carotenoid loss:

$$t = \frac{\ln \frac{C_0}{C_t}}{k_i},$$

where C_0 – initial carotenoid content, mg/100 g; C_t – carotenoid content at the critical storage time (corresponding to 80 % retention), mg/100 g; k_i – rate constant under specific conditions (packaging atmosphere, temperature), month⁻¹.

The calculated data are presented graphically in Figure 4. The vertical distance between curves reflects the relative effectiveness of one atmosphere versus another at a given temperature. For instance, the gap between the vacuum and air curves illustrates the shelf-life extension achieved through vacuum packaging.

The slope of each curve indicates the sensitivity of shelf life to temperature changes. The steep slope for air storage demonstrates that shelf life declines sharply with increasing temperature, confirming strong temperature dependence. Conversely, the gentler slope for vacuum packaging indicates superior resilience to temperature fluctuations.

Figure 4 shows that at temperatures below 10 °C, modified atmospheres of N₂ and CO₂ provide slightly longer shelf life than vacuum. However, as temperature increases further, vacuum packaging becomes significantly more effective.

These findings provide a robust scientific basis for selecting optimal storage conditions and packaging strategies for this product.

The present study quantitatively evaluated the impact of two critical storage factors (temperature and packaging atmosphere) on carotenoid stability in enzyme-hydrolyzed pumpkin powder. The results are consistent with established literature on the degradation kinetics of labile lipophilic pigments and offer new insights into the synergistic effects of these factors.

Kinetic order of the reaction and degradation mechanism. The high coefficients of determination ($R^2 > 0.998$) obtained when fitting the experimental data to the first-order kinetic model unequivocally indicate that the degradation rate of carotenoids is directly proportional to their current concentration. This conclusion holds true across all tested packaging atmospheres. Our findings align with earlier studies [7, 10] and confirm that both oxidative degradation in the presence of oxygen and thermal decomposition under inert atmospheres follow the same formal kinetic order. This consistency validates the use of the Arrhenius equation to describe the temperature dependence of the degradation process.

Critical role of oxygen and effectiveness of barrier packaging. A direct comparison of rate constants (k) clearly demonstrates the detrimental impact of molecular oxygen. At 4 °C, the degradation rate in air ($k = 0.0305$ month⁻¹) was 2.4–2.7 times higher than in inert atmospheres. At 30 °C, this difference widened to 3.0–5.1 times. This provides compelling evidence that oxidative pathways dominate carotenoid degradation in aerated systems. These results strongly justify the use of modified atmosphere packaging (MAP) for preserving the functional properties of enzyme-hydrolyzed pumpkin powder. All tested inert environments (vacuum, nitrogen, and carbon dioxide) proved highly effective compared to air.

Activation energy as an indicator of reaction mechanism. The most insightful aspect of our analysis lies in the activation energy (E_a) values. For samples stored in air, E_a was relatively low (41.41 kJ/mol),

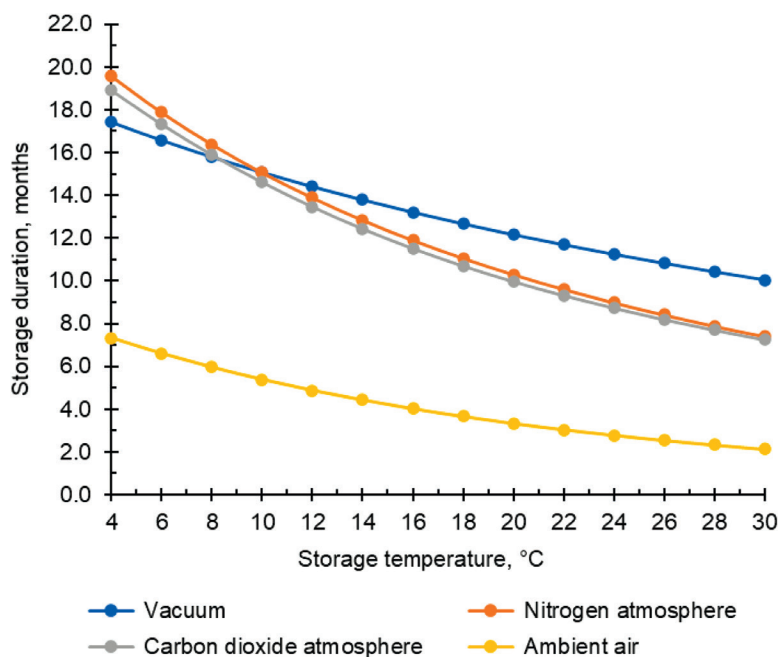


Figure 4. Dynamics of shelf life of enzyme-hydrolyzed pumpkin powder based on Arrhenius model predictions

which is typical for reactions limited not by temperature but by the concentration of a key reactant – in this case, oxygen. Since oxygen was present in excess and constant within sealed pouches, the reaction rate showed only moderate temperature dependence, as oxygen availability was the primary driver. In contrast, samples stored under vacuum or in inert gases exhibited significantly higher E_a values (48.83–59.36 kJ/mol). This shift indicates a fundamental change in the rate-limiting step: In the absence of oxygen, degradation proceeds primarily via thermal decomposition, isomerization, or reaction with trace residual oxygen – processes that involve a high energetic barrier. Consequently, under oxygen-free conditions, the degradation rate becomes strongly temperature-dependent.

Comparative analysis of inert gas atmospheres. The statistically insignificant difference between nitrogen ($E_a = 59.36$ kJ/mol) and carbon dioxide ($E_a = 58.49$ kJ/mol) confirms their nearly identical effectiveness as protective atmospheres for enzyme-hydrolyzed pumpkin powder. This practical observation allows flexibility in gas selection based on cost, availability, or technological considerations (e.g., CO_2 may offer additional bacteriostatic benefits). Of particular scientific and practical interest is the superior performance of vacuum packaging at elevated temperatures. Although at 4 °C the degradation rate under vacuum ($k = 0.0128$ month⁻¹) was slightly higher than under N_2 ($k = 0.0114$) or CO_2 ($k = 0.0118$), at 30 °C vacuum proved significantly more effective ($k = 0.0332$ vs. 0.0519 and 0.0554, respectively). This may be attributed to either (i) gradual micro-ingress of oxygen through the pouch material over time in gas-filled packages, or (ii) more efficient removal of oxygen adsorbed on the powder particle surfaces under vacuum conditions.

Shelf-life prediction and practical recommendations. The Arrhenius-based shelf-life curves (see Figure 4) provide a robust decision-making tool for industrial applications. For supply chains with guaranteed refrigerated storage (0–4 °C), nitrogen or CO_2 packaging is optimal, yielding a predicted shelf life of 19–20 months (i.e., time until 20 % carotenoid loss). For room-temperature storage and distribution, vacuum packaging is superior, offering a shelf life of ~13 months, compared to 9.5–11.0 months under N_2 or CO_2 . Air packaging is unacceptable: even under refrigeration, shelf life does not exceed 7.5 months, and at room temperature, 20 % carotenoid loss occurs within just 2.5 months.

Conclusion. The present study confirmed that the degradation of carotenoids in enzyme-hydrolyzed pumpkin powder follows first-order kinetics. The effects of storage temperature and packaging atmosphere composition on the degradation rate were quantitatively assessed. It was established

that the use of modified atmosphere packaging increases the product's shelf life by 3 to 8 times compared to storage in air. Moreover, the observed shift in activation energy depending on the packaging atmosphere indicates a fundamental change in the degradation mechanism: from oxidation-driven under aerobic conditions to thermally driven in oxygen-depleted environments. For the first time, it was demonstrated that vacuum packaging outperforms inert gas atmospheres (N₂ and CO₂) for enzyme-hydrolyzed pumpkin powder stored at elevated temperatures (e.g., room temperature). This finding has significant practical implications for real-world supply chains, where strict temperature control cannot always be guaranteed.

The practical relevance of this work lies in providing scientifically grounded recommendations for packaging selection: vacuum packaging is recommended for long-term storage under conditions prone to temperature fluctuations or abuse; nitrogen or carbon dioxide atmospheres are preferable when refrigerated storage (0–4 °C) is reliably maintained.

Future research directions may include: (i) investigating the influence of product moisture content on the protective efficacy of various gas atmospheres; (ii) identifying and quantifying specific oxidation by-products; (iii) exploring the application of enzyme-hydrolyzed pumpkin powder in functional food systems, building on existing experience with pumpkin-based ingredients in dairy formulations [29, 30].

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 075-03-2024-105; Topic No. FZMM-2024-0003; State Registration No. 124013000666-5).

Благодарности. Данное исследование проведено в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-105; тема № FZMM-2024-0003; рег. № НИОКТР 124013000666-5).

References

1. Nikolaeva M. A. Changes in the lipid composition of intact and mechanically damaged carrots during storage. *Tovaroved prodovol'stvennykh tovarov = Food Products Commodity Expert*, 2021, no. 12, pp. 923–926 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/igt-01-2112-06>
2. Karadeniz F., Işık B., Kaya S., Aslanali O., Midilli F. Kinetics of nonenzymatic browning reactions in pumpkin puree during storage. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 101–111. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1400745>
3. Guerra-Vargas M., Jaramillo-Flores M. E., Dorantes-Alvarez L., Hernandez-Sanchez H. Carotenoid retention in canned pickled jalapeno peppers and carrots as affected by sodium chloride, acetic acid, and pasteurization. *Journal of Food Science*, 2001, vol. 66, no. 4, pp. 620–626. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb04611.x>
4. Lin C. H., Chen B. H. Stability of carotenoids in tomato juice during storage. *Food Chemistry*, 2005, vol. 90, no. 4, pp. 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.031>
5. Jirasatid S., Chaikham P., Nopharatana M. Thermal degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree using Arrhenius, Eyring-Polanyi and Ball models. *International Food Research Journal*, 2018, vol. 25, no. 5, pp. 2121–2129.
6. Dyakov O., Belinska S. Biological value of quick-frozen juices with pulp. *Tovari i rinky = Commodities and Markets*, 2013, no. 2 (16), pp. 84–93 (in Ukrainian).
7. Tang Y. C., Chen B. H. Pigment change of freeze-dried carotenoid powder during storage. *Food Chemistry*, 2000, vol. 69, no. 1, pp. 11–17. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00216-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00216-2)
8. Kotvitskaya D. V., Nikolaenko S. N. Changes in the content of carotenoids in tomatoes during storage. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: sbornik statei po materialam 74-i nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov po itogam NIR za 2018 god* [Scientific support of the agro-industrial complex: a collection of articles based on the materials of the 74th student scientific and practical conference on research results for 2018]. Krasnodar, 2019, pp. 489–491 (in Russian).
9. Samoilov A. V., Suraeva N. M., Zaitseva M. V. Changes in quality and safety indicators of sliced carrot products at different storage temperatures. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*, 2024, no. 3, pp. 71–74 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.3.3.013>
10. Song J., Wei Q., Wang X., Li D., Liu C., Zhang M., Meng L. Degradation of carotenoids in dehydrated pumpkins as affected by different storage conditions. *Food Research International*, 2018, vol. 107, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.024>
11. Ouyang M., Huang Y., Wang Y., Luo F., Liao L. Stability of carotenoids and carotenoid esters in pumpkin (*Cucurbita maxima*) slices during hot air drying. *Food Chemistry*, 2022, vol. 367, art. 130710. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130710>

12. Lyu Y., Bi J., Chen Q., Li X., Lyu C., Hou H. Color, carotenoids, and peroxidase degradation of seed-used pumpkin byproducts as affected by heat and oxygen content during drying process. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, vol. 13, no. 11, pp. 1929–1939. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02532-8>
13. Atencio S., Verkempinck S. H. E., Reineke K., Hendrickx M., Van Loey A. Heat and light stability of pumpkin-based carotenoids in a photosensitive food: a carotenoid-coloured beverage. *Foods*, 2022, vol. 11, no. 3, art. 485. <https://doi.org/10.3390/foods11030485>
14. Fernandez Garcia A., Butz P., Tauscher B. Effects of high-pressure processing on carotenoid extractability, antioxidant activity, glucose diffusion, and water binding of tomato puree (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Food Science*, 2001, vol. 66, no. 7, pp. 1033–1038. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb08231.x>
15. Navas N. M., Obregón L. G., Peralta Y. Y. Behavior of totals carotenoids and color of a mixture of pumpkin puree (*Cucurbita moschata*) during storage at 4 °C. *Italian Journal of Food Science*, 2019, vol. 31, no. 3, pp. 50–60.
16. Macura R., Michalczyk M., Fiutak G., Maciejaszek I. Effect of freeze-drying and air-drying on the content of carotenoids and anthocyanins in stored purple carrot. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 135–142. <https://doi.org/10.17306/j.afs.0637>
17. Regier M., Mayer-Miebach E., Behsnillian D., Neff E., Schuchmann H. P. Influences of drying and storage of lycopene-rich carrots on the carotenoid content. *Drying Technology*, 2005, vol. 23, no. 4, pp. 989–998.
18. Samoylov A. V., Nikolaeva Ju. V., Katsevich A. A., Tarasova V. V. Study of the effect of antioxidants on the stabilization of colorant paprika extract in syrups. *Pivo i napiitki = Beer and Beverages*, 2024, no. 4, pp. 14–18 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PIN.2024.04.03>
19. Nguyen C. L., Dang T. T., Nguyen T. D., Nguyen P. N., Tran N. C., Tong N. T. Effects of potassium sorbate and ascorbic acid concentrations on physio-chemical properties and stability of pumpkin puree in chilled storage. *Chemical Engineering Transactions*, 2024, vol. 113, pp. 139–144. <https://doi.org/10.3303/CET24113024>
20. Onwude D. I., Hashim N., Janius R., Nawi N. M., Abdan K. Color change kinetics and total carotenoid content of pumpkin as affected by drying temperature. *Italian Journal of Food Science*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.14674/1120-1770%2Fijfs.v398>
21. De Ancos B., Sgroppo S., Plaza L., Cano M. P. Possible nutritional and health-related value promotion in orange juice preserved by high-pressure treatment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, vol. 82, no. 8, pp. 790–796. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1093>
22. Yanchenko E. V. Persistence of modern varieties and hybrids of carrots and its dependence on the biochemical composition. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*, 2020, no. 10, pp. 16–19 (in Russian). <https://doi.org/10.25630/PAV.2020.48.63.001>
23. Yanchenko E. V., Borisov V. A., Yanchenko A. V. Biochemical quality indices and storability of domestic and foreign varieties and hybrids of carrot. *Pishchevye sistemy: teoriya, metodologiya, praktika: sbornik nauchnykh trudov XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov otdeleniya sel'skokhozyaistvennykh nauk Rossiiskoi akademii nauk* [Food systems: theory, methodology, practice: a collection of scientific papers of the XI International scientific and practical conference of young scientists and specialists of Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2017, pp. 404–411 (in Russian).
24. Kampuse S., Tomson L., Klava D., Ozola L., Galoburda R. The influence of processing and storage conditions on quality parameters of pumpkin puree. *FOODBALT 2019. 13th Baltic conference on food science and technology "Food. Nutrition. Well-Being", Jelgava, Latvia, 2–3 May 2019: conference proceedings*. Jelgava, 2019, pp. 137–142. <https://doi.org/10.22616/FoodBalt.2019.013>
25. Chen B. H., Tang Y. C. Processing and stability of carotenoid powder from carrot pulp waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, vol. 46, no. 6, pp. 2312–2318. <https://doi.org/10.1021/jf9800817>
26. Roongruangsri W., Bronlund J. E. Effect of air-drying temperature on physicochemical, powder properties and sorption characteristics of pumpkin powders. *International Food Research Journal*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 962–971.
27. Nawirska-Olszańska A., Biesiada A., Sokół-Łętowska A., Kucharska A. Z. Effect of preparation and storage conditions on physical and chemical properties of puree, puree juices and cloudy juices obtained from pumpkin with added Japanese quince and strawberries. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2016, vol. 44, no. 1, pp. 183–188. <https://doi.org/10.15835/nbha44110238>
28. Rozhnov E. D., Shkolnikova M. N., Abbazova V. N., Zakharov V. L. Dried fermented semi-finished product from pumpkin pulp as a base for food systems. *Polzunovskii vestnik = Polzunovskiy vestnik*, 2025, no. 1, pp. 58–68 (in Russian). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006>
29. Musina O. N. The modern state of biotechnology of the combined milk products. 1. Preconditions and principles of creation of the combined milk products. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya = Storage and Processing of Farm Products*, 2008, no. 3, pp. 59–63 (in Russian).
30. Abbazova V. N., Shkolnikova M. N., Karkh D. A. Fermented pumpkin puree effect on the activity of fermented milk products probiotic microflora and organoleptic indicators. *Industriya pitaniya = Food Industry*, 2024, vol. 9, no. 4, pp. 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-4-6>

Information about the authors

Evgeny D. Rozhnov – Dr. Sc. (Engineering), Professor of the Department of Biotechnology, Researcher of the Laboratory “AltaiBioLakt”, Polzunov Altai State Technical University (46, Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>. E-mail: red.bti@yandex.ru

Marina N. Shkolnikova – Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biotechnology, Leading Researcher of the Laboratory “AltaiBioLakt”, Polzunov Altai State Technical University (46, Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>. <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>. E-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru

Olga N. Musina – Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Food Technology, Chief Researcher of the Laboratory “AltaiBioLakt”, Polzunov Altai State Technical University (46, Lenin Ave., Barnaul, 656038, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>. E-mail: musinaolga@gmail.com

Информация об авторах

Рожнов Евгений Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии, научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт», Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>. E-mail: red.bti@yandex.ru

Школьникова Марина Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологии, ведущий научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт», Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>. <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>. E-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru

Мусина Ольга Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии продуктов питания, главный научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт», Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (пр. Ленина, 46, Барнаул, 656038, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>. E-mail: musinaolga@gmail.com