



Национальный
исследовательский

Томский
государственный
университет

ISSN 2949-1665

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

№ 9

2025

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2025

№ 9

Регистрационный номер
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдан Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 28006



Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2025

Учредитель:
Национальный исследовательский Томский государственный университет

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА
«ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»**

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета,
д-р хим. наук, профессор, академик РАН,
почетный доктор НИ ТГУ
Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор
И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.А. Дынкин – д-р экон. наук, профессор,
академик РАН
С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор
С.Д. Каракотов – д-р хим. наук, профессор,
академик РАН
М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.В. Лопатин – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
Г.В. Сакович – д-р техн. наук, профессор,
академик РАН
В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор,
академик РАН
А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор, академик РАН
А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук,
профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук, профессор
М.Г. Хмелева – ответственный секретарь,
канд. физ.-мат. наук

С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук
Н.А. Глушенко – канд. ист. наук
К.С. Голохваст – д-р биол. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАО
В.М. Грузнов – д-р техн. наук
Е.А. Данилова – д-р полит. наук
И.А. Жуков – д-р техн. наук
А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук
Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А.С. Князев – д-р хим. наук
М.И. Лернер – д-р техн. наук
Е.М. Максимов – д-р техн. наук
Г.Я. Павловец – д-р техн. наук, профессор
О.С. Покровский – канд. геол.-минерал. наук
А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАН
В.С. Смирнов – канд. хим. наук
В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А. Тсатсакис – д-р биол. наук, иностранный член РАН
С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук
С. Дас – DRDO, Индия

**EDITORIAL COUNCIL
LIFE SAFETY /
SECURITY TECHNOLOGIES**

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council,
Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy
of Sciences, Honorary Doctor of TSU
Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor
Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander A. Dynkin – Dr.Sc. (Economics), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor
Salis D. Karakotov – Dr.Sc. (Chemistry), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexey V. Lopatin – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Gennady V. Sakovich – Dr.Sc. (Engineering), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Vladimir P. Chkhonin – Dr.Sc. (Medicine), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc.
(Physics and Mathematics), Professor
Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc.
(Physics and Mathematics)

Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)
Kirill S. Golokhvast – Dr.Sc. (Biology), Professor
of the Russian Academy of Sciences, corresponding member
of the Russian Academy of Education
Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)
Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)
Ilya A. Zhukov – Dr.Sc. (Engineering)
Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Alexey S. Knyazev – Dr.Sc. (Chemistry)
Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)
Evgeniy M. Maksimov – Dr.Sc. (Engineering)
Georgiy Y. Pavlovets – Dr.Sc. (Engineering), Professor
Oleg S. Pokrovsky – Cand.Sc. (Geological and Mineral Sciences)
Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor of the Russian
Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy
of Sciences
Vladimir S. Smirnov – Cand.Sc. (Chemistry)
Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Aristidis Tsatsakis – Dr.Sc. (Biology), Foreign Member of the Russian
Academy of Sciences
Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Sushanta Das – DRDO, India

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.
E-mail: safety@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Биотехнологии

Михайлов Ю.М., Даровских А.В., Гаранин В.А., Ворожейкин М.И., Набатова А.В., Казаков А.И. О безопасности использования и химической стабильности водорастворимых нитратов циклодекстринов лекарственного назначения	5
Памирский И.Э., Артеменко А.Ф., Асатурова А.М., Томашевич Н.С., Голохваст К.С. Биопестициды, как инструмент биоконтроля в сельском хозяйстве	15

Технологии материаловедения

Евсеев Н.С., Хрусталёв А.П., Бельчиков И.А., Хмелева М.Г., Жуков И.А. Исследование влияния механической активации на структуру и свойства керамики FeV ₅₀ -Cr-Ti- Hf-N	28
Чеботова А.А., Бородулин З.И., Петров И.С., Шеремет Е.С., Лапин И.Н., Липатов Е.И., Ворожцов А.Б. Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов	36

Технологии противодействия техногенным угрозам

Шашев Д.В., Рыжих Ю.Н., Ерофеев А.А., Шидловский С.В., Нестерова Н.В., Костюшин К.В., Аскеров А., Червакова А.В., Архипов В.А., Басалаев С.А., Булавко А.М., Перфильева К.Г., Федоров С.М., Юстус А.В., Исмаилов К., Шипилов С.Э. Научный задел и потенциал Томского государственного университета для развития новой отрасли беспилотных авиационных систем	44
Хмелёв В.Л., Еремеев А.И., Васин В.В., Ерзакова Н.Н. Комбинирование радиоволнового и оптического изображений в задаче визуализации скрытых объектов в инженерных конструкциях	61
Сахапов А.А. Гибридная нейросетевая архитектура веб-приложения для виртуального проектирования интерьера на основе изображения	68

CONTENTS

Biotechnologies

Mikhailov Yu.M., Darovskikh A.V., Garanin V.A., Vorozheikin M.I., Nabatova A.V., Kazakov A.I. Safety and chemical stability of water-soluble cyclodextrin nitrates for pharmaceutical applications	5
Pamirsky I.E., Artemenko A.F., Asaturova A.M., Tomashevich N.S., Golokhvast K.S. Biopesticides as tools for biological control in agriculture	15

Materials science technologies

Evseev N.S., Khrustalev A.P., Belchikov I.A., Khmeleva M.G., Zhukov I.A. Study of the influence of mechanical activation on the structure and properties of ceramics FeV ₅₀ -Cr-Ti- Hf-N	28
Chebotova A.A., Borodulin Z.I., Petrov I.S., Sheremet E.S., Lapin I.N., Lipatov E.I., Vorozhtsov A.B. Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds	36

Technologies for countering technogenic threats

Shashev D.V., Ryzhikh Yu.N., Yerofeyev A.A., Shidlovskiy S.V., Nesterova N.V., Kostyushin K.V., Askerov A., Chervakova A.V., Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Bulavko A.M., Perfilieva K.G., Fedorov S.M., Justus A.V., Ismailov K., Shipilov S.E. The scientific reserve and potential of Tomsk State University for the development of a new industry of unmanned aircraft systems	44
Khmelev V.L., Ereemeev A.I., Vasin V.V., Erzakova N.N. Combining radio wave and optical imaging in the task of visualizing hidden objects in engineering structures	61
Sakhapov A.A. Hybrid neural network architecture for virtual interior design web-application based on image	68

Биотехнологии

Научная статья

УДК 547.458.68:547-316+615.032

doi: 10.17223/29491665/9/1

О безопасности использования и химической стабильности водорастворимых нитратов циклодекстринов лекарственного назначения

Юрий Михайлович Михайлов¹, Анна Владимировна Даровских², Виктор Александрович Гаранин³,
Михаил Игоревич Ворожейкин⁴, Альбина Валентиновна Набатова⁵,
Анатолий Иванович Казаков⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

¹ yumm@icp.ac.ru

² avd@icp.ac.ru

⁶ akazakov@icp.ac.ru

Аннотация. Выполнен комплекс исследований нитратов α -, β - и γ -циклодекстринов с предельно низким содержанием азота в целях системного обоснования возможности их безопасного использования в составе лекарственных препаратов. Поскольку исследуемые соединения содержат в своей структуре эксплозофорные нитратные функциональные группы, придающие содержащим их химическим соединениям взрывчатые свойства, в соответствии с ГОСТ 4545-88 и ГОСТ Р 50835-95 была проведена оценка их чувствительности к механическим воздействиям, к удару и трению соответственно. Установлено, что при максимально возможных уровнях стандартизованного механического воздействия к удару при сбрасывании груза массой 10 кг с высоты 100 см и к трению при усилии более 1000 МПа – соединения не взрываются и не воспламеняются, т.е. являются нечувствительными и взрывобезопасными. Также проведены кинетические исследования термической стабильности исследуемых соединений, которые позволили определить, что процесс разложения рассматриваемых веществ протекает в 2 стадии, рассчитать константы скорости и энергии активации термического разложения для всех исследованных образцов для обеих стадий, что в свою очередь позволило сделать вывод о высокой химической стойкости рассматриваемых соединений. Кроме того, на основании полученных данных было рассчитано время достижения глубины разложения 0,02% отн., которое при температуре 25–30°C составляет более 250 лет.

Ключевые слова: нитраты циклодекстринов, чувствительность к удару, чувствительность к трению, химическая стойкость, термическая стабильность, гарантийный срок хранения

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-13-00288.

Для цитирования: Михайлов Ю.М., Даровских А.В., Гаранин В.А., Ворожейкин М.И., Набатова А.В., Казаков А.И. О безопасности использования и химической стабильности водорастворимых нитратов циклодекстринов лекарственного назначения // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 5–14. doi: 10.17223/29491665/9/1

Original article

doi: 10.17223/29491665/9/1

Safety and chemical stability of water-soluble cyclodextrin nitrates for pharmaceutical applications

Yuri M. Mikhailov¹, Anna V. Darovskikh², Viktor A. Garanin³, Mikhail I. Vorozheikin⁴,
Albina V. Nabatova⁵, Anatoly I. Kazakov⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation

¹ yumm@icp.ac.ru

² avd@icp.ac.ru

⁶ akazakov@icp.ac.ru

Abstract. A series of studies of α -, β - and γ -cyclodextrin nitrates with extremely low nitrogen content was carried out in order to systematically justify the possibility of their safe use in medicinal preparations. Since the compounds under study contain nitrate functional groups, which impart explosive properties to chemical substances containing them, an assessment of their sensitivity to mechanical impact, shock and friction was performed in accordance with GOST 4545-88 and GOST R 50835-95. It was established that, even at the maximum standardized levels of mechanical impact (shock generated by dropping a 10-kg load from a height of

100 cm) and friction (under a pressure exceeding 1000 MPa), the compounds do not explode or ignite, i.e., they are insensitive and explosion-proof. Kinetic studies of the thermal stability of the compounds were also conducted, which made it possible to determine that the decomposition process of the substances under consideration occurs in two stages, and to calculate the rate constants and activation energies of thermal decomposition for all studied samples at both stages. These results, in turn, allow the conclusion that the compounds possess high chemical stability. In addition, based on the obtained data, the time required to reach a decomposition depth of 0.02 % (rel.) was calculated, which at temperatures of 25–30 °C exceeds 250 years.

Keywords: cyclodextrin nitrates, impact sensitivity, friction sensitivity, chemical resistance, thermal stability, guaranteed shelf life

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project № 24-13-00288.

For citation: Mikhailov, Yu.M., Darovskikh, A.V., Garanin, V.A., Vorozheikin, M.I., Nabatova, A.V. & Kazakov, A.I. (2025). Safety and chemical stability of water-soluble cyclodextrin nitrates for pharmaceutical applications. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeiatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 5–14 (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/1

Введение

Нитраты циклодекстринов (НЦД) являются модифицированными производными циклодекстринов (ЦД) – циклических соединений, содержащих в молекуле 6, 7 или 8 глюкопиранозных звеньев (α -, β - и γ -ЦД, соответственно). Исходя из наличия и количества нитратных групп в НЦД, их молекулы могут быть использованы как в качестве энергетических соединений, так и в качестве лекарственных соединений. Так, в работе [1] сообщается о взрывчатых свойствах НЦД, в которых все гидроксильные группы замещены на нитратные. Авторы установили, что по своим свойствам полностью нитрованные НЦД относятся к мощным бризантным ВВ. Кроме того, имеется ряд патентов [2–5], в которых показана возможность использования НЦД в составе энергетических конденсированных систем.

Вместе с тем относительно недавно было предложено использовать низконитрованные водорастворимые НЦД в фармацевтических целях [6, 7] для получения на их основе комплексов включения (КВ) с физиологически активными веществами. С учетом возможности НЦД как представителей органических нитратов выступать донором экзогенного монооксида азота, проявляющего уникальное биологическое воздействие на организм человека, получение таких КВ может позволить привнести дополнительный фармацевтический эффект.

В частности, в работе [8] была показана возможность получения КВ биологически активных соединений с НЦД на примере низконитрованного γ -НЦД и 2-[(3-пиридинилкарбонил)-амино]этилнитрата (никорандил) и 1,4:3,6-диангидро-D-глюцита 5-нитрата (изосорбидмононитрат) и изучены их отдельные свойства. В том числе установлено, что полученный с никорандилом КВ проявляет синергию антиоксидантной активности. Помимо этого, в работе [9] была исследована и доказана возможность получения КВ

γ -НЦД с конъюгатом тетрагидрокарбазола и аминоксадамантина (ТГ-2112х), перспективным лекарственным препаратом для лечения нейродегенеративных заболеваний. В отличие от индивидуального ТГ-2112х его КВ с γ -НЦД растворим в воде, что повысило его биодоступность и позволило выполнить необходимые биологические исследования. Установлено, что КВ, сохраняя лекарственные свойства ТГ-2112х, проявляет митопротекторную и микротубуло-стабилизирующую активности, а также обладает выраженной антиоксидантной активностью, эффективно подавляя спонтанное перекисное окисление липидов в гомогенате мозга крыс.

Ранее был исследован процесс получения водорастворимых нитратов, определена их острая токсичность [10] и предельная растворимость в воде, исследована способность НЦД воздействовать на ключевые биологические мишени при лечении нейродегенеративных заболеваний [11].

Несмотря на полученные положительные результаты и неоспоримую перспективность применения водорастворимых НЦД для доставки лекарственных субстанций, вопрос безопасности обращения с ними ранее не был рассмотрен. Вместе с тем, наличие в составе молекулы нитратных функциональных групп, даже в небольшом количестве, может придать этим соединениям взрывчатые свойства недостаточную химическую стойкость.

В этой связи целью настоящей работы явились оценка способности водорастворимых низконитрованных НЦД лекарственного назначения к взрывчатому превращению на основании стандартных исследований их чувствительности к механическим воздействиям, а также изучение кинетических закономерностей термического распада указанных соединений при различных температурах и прогнозирование на основании этих данных сроков сохранности их химического состава при нормальных условиях хранения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись α -, β - и γ -НЦД, полученные по методике, подробно описанной в работах [10, 12, 13], в которых две гидроксильные первичные группы замещены на нитратные группы.

Анализ содержания нитратного азота в НЦД проводился с помощью потенциометрического ферро-сульфатного титрования (ФСТ), которое традиционно применяется для определения содержания нитратного азота в нитроцеллюлозе [14] и было успешно апробировано на НЦД и нитратах сверхразветвленных полиглицидолов [15, 16].

Оценка чувствительности НЦД к механическим воздействиям в данной работе проводилась с использованием стандартных методик: для определения чувствительности к удару ГОСТ 4545-88 [17], для определения чувствительности к трению ГОСТ Р 50835-95 [18].

О термической устойчивости α -, β - и γ -НЦД судили на основании данных о тепловыделении при их распаде, которое регистрировали в изотермических условиях в интервале температур 167,5–185,5°C с помощью дифференциального автоматического микрокалориметра ДАК-1-2, позволяющего измерять скорость тепловыделения в пределах 10^{-5} –1,0 Вт с постоянной времени 10–100 с с неограниченной длительностью регистрации эксперимента [19].

Калориметрические кинетические исследования проводили в закрытой системе: стеклянные ампулы с навеской ~ 20 мг НЦД предварительно вакуумировали до остаточного давления 1,3 Па, после чего ампулу запаивали и помещали в калориметр. Ампулы с образцами не имели холодных частей, что позволило сохранять все продукты превращения в зоне реакции. В большинстве опытов объем ампул составлял ~ 2 см³, а величина отношения массы образца к свободному объему ампулы (m/V) – около $1 \cdot 10^{-2}$ г/см³. В единичных опытах при температуре 180,1°C величину m/V увеличивали примерно в 2 раза для определения ее влияния на скорость реакции термического разложения нитратов циклодекстринов. Методики обработки результатов не отличались от ранее описанных [20–22].

Обсуждение результатов

Химическая стабильность. Химическая стойкость, т.е. способность лекарственного препарата сохранять свои фармакологические свойства в неизменном виде в течение определенного времени, является одной из важных характеристик лекарств, которые хранятся и применяются в течение определенного отрезка времени. Из внешних факторов, которые могут

разрушать препарат (температура, свет, влага, микроорганизмы), только от температуры нельзя защитить лекарство с помощью предварительной обработки и непроницаемой упаковки. Первопричиной изменения фармакологических свойств являются химические процессы, протекающие в препарате (в основном – реакция его термического разложения). Таким образом, проблема изучения химической стабильности лекарственного препарата сводится к изучению реакции его термического разложения.

Из литературы известно [23], что в ряду нитросоединений наименее химически стабильными являются именно О-нитросоединения, типичными представителями которых выступают рассматриваемые в работе НЦД. Переход от задачи установления изменения фармакологических свойств препарата в ходе форсированного старения к методически более простому изучению терморазложения требует введения нормы стабильности, определяющей предельно допустимую глубину разложения, при которой фармакологические свойства препарата сохраняются в неизменном виде. В каждом отдельном случае вопрос о величине нормы стабильности требует специального изучения и обоснования. Для первичной оценки термостабильности можно иметь данные по времени достижения глубины разложения 0,02, 0,1 и 1% отн. при ряде температур хранения и применения. В этой связи с помощью кинетических калориметрических измерений была исследована скорость термического разложения исследуемых НЦД.

Вид зависимости скоростей тепловыделения в реакции термического разложения НЦД при различных температурах от времени и текущей теплоты процесса представлен на рис. 1.

Близость химического строения НЦД и нитратов целлюлозы позволяет предположить, что процесс термической деструкции протекает в 2 стадии, что подтверждается экспериментальными данными. Полная теплота реакции разложения исследуемых α -, β - и γ -НЦД составляет примерно 1,6 кДж/г. Как видно из рис. 1, реакция разложения НЦД протекает с самоускорением, уже на малых глубинах превращения имеет место существенный вклад в скорость тепловыделения от автокаталитической реакции. На кривых зависимости скорости тепловыделения от времени и текущей теплоты процесса фиксируется несколько экстремумов, в итоге кривая скорости не описывается ни одним из известных законов для автокаталитических реакций.

Для нахождения константы скорости начальной реакции (k_1) и константы скорости каталитической реакции (k_2), на основе которой рассчитываются гарантийные сроки хранения соединений, начальный участок скоростной кривой был проанализирован в

координатах автокаталитической реакции первого порядка, т.е. построена зависимость удельной скорости реакции $(d\eta/dt)/(1-\eta)$ от глубины разложения η для всех трех исследованных НЦД при всех экспериментальных температурах.

На рис. 2. для примера приведена подобного рода зависимость для реакции термического разложения α -НЦД.

Из рис. 2 видно, что как минимум до 20%-ной глубины разложения эти зависимости аппроксимируются прямой линией, описываемой уравнением $(d\eta/dt)/(1-\eta) = k_1 + k_2 \cdot \eta$ для автокаталитической реакции первого порядка. Из величин отрезков, отсекаемых на оси ординат, и из величин тангенсов углов наклона найдены соответствующие величины k_1 и k_2 (табл. 1).

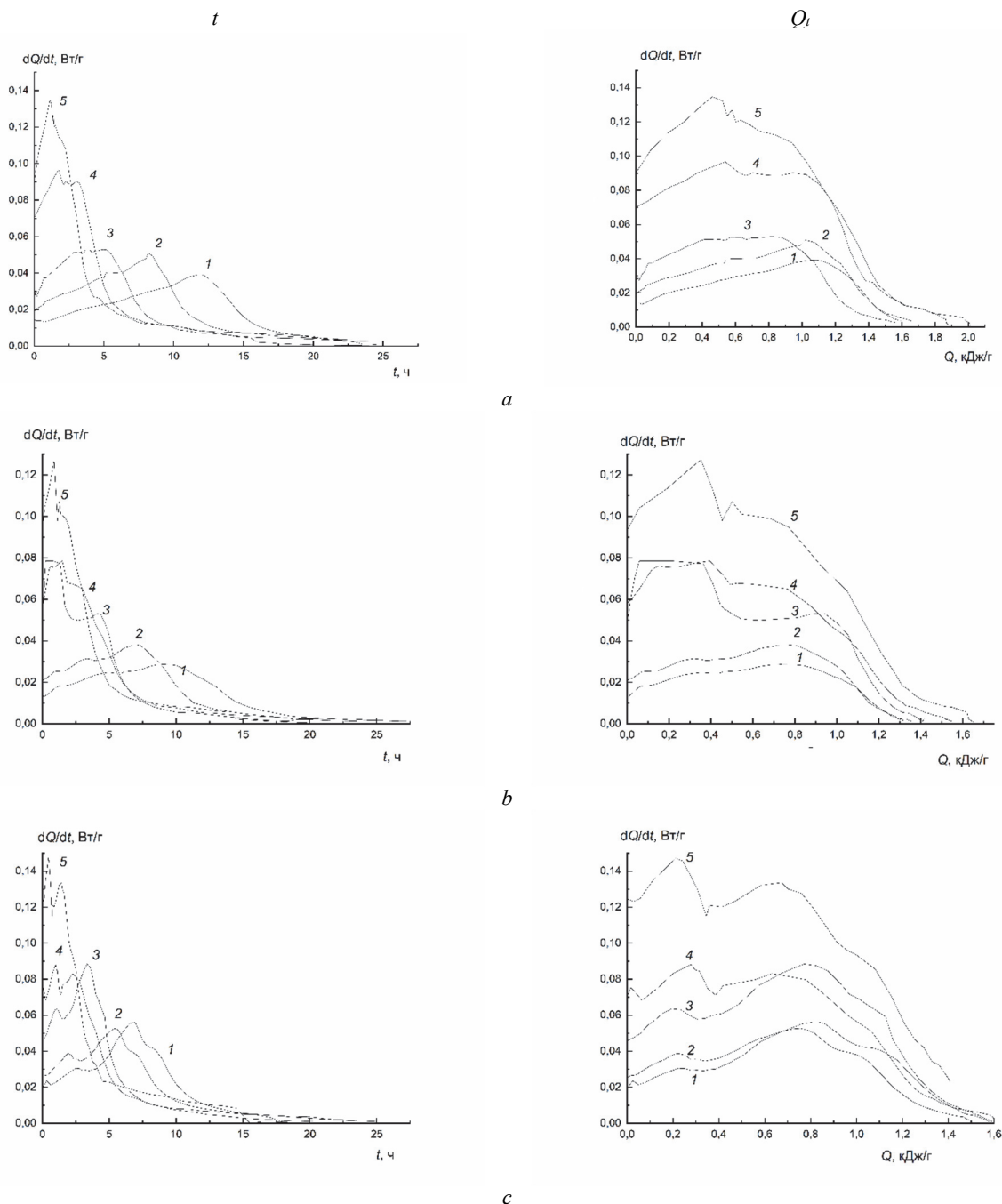


Рис. 1. Зависимости скорости тепловыделения dQ/dt , Вт·г⁻¹ от времени (t , ч) и текущей теплоты реакции (Q_t , кДж·г⁻¹) при термическом разложении α - (a), β - (b) и γ -НЦД (c) в твердой фазе при различных температурах:
1 – 167,5; 2 – 169,2; 3 – 175,0; 4 – 180,1; 5 – 185,5 °C

Fig. 1. Dependences of the rate of heat release dQ/dt , W g⁻¹ on time (t , h) and the current heat of reaction (Q_t , kJ g⁻¹) during the thermal decomposition of α - (a), β - (b) and γ -NCD (c) in the solid phase at different temperatures:
1 – 167,5; 2 – 169,2; 3 – 175,0; 4 – 180,1; 5 – 185,5 °C

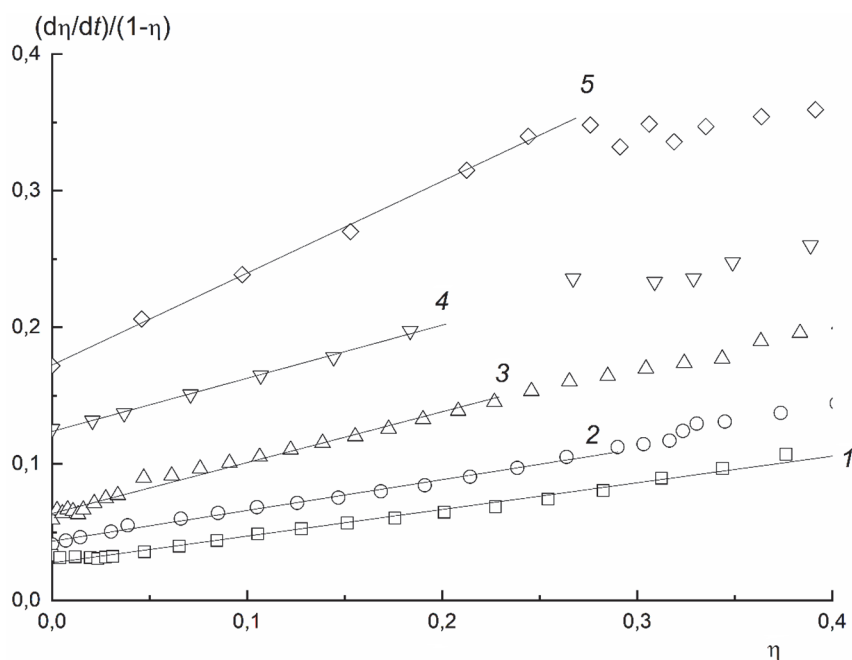


Рис. 2. Зависимости удельной скорости реакции термического разложения α-НЦД в твердой фазе от глубины реакции при различных температурах: 1 – 167,5; 2 – 169,2; 3 – 175,0; 4 – 180,1; 5 – 185,5 °C

Fig. 2. Dependences of the specific reaction rate of thermal decomposition of α-NCD in the solid phase on the reaction depth at different temperatures: 1 – 167,5; 2 – 169,2; 3 – 175,0; 4 – 180,1; 5 – 185,5 °C

При построении зависимостей констант скоростей реакций от температуры в координатах уравнения Аррениуса ($k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$) получены следующие величины энергии активации и предэкспоненциальных множителей для реакции термического разложения α-, β- и γ-НЦД (табл. 2).

Данные, представленные в табл. 1, 2, демонстрируют, что различие в величинах констант скоростей

разложения α-, β- и γ-НЦД находится в пределах ошибки измерения, что в свою очередь указывает на отсутствие влияния количества глюкопиррозных циклов в составе исходного ЦД, поэтому для дальнейших расчетов было целесообразно описать температурные зависимости констант скоростей k_1 и k_2 реакции термического разложения для всех трех нитратов α-, β- и γ-циклодекстринов объединенными усредненными зависимостями (рис. 3).

Таблица 1

Величины констант скоростей реакции термического разложения α-, β- и γ-НЦД

T, °C	α-НЦД			β-НЦД			γ-НЦД		
	$m/V \cdot 10^2$, г/см ³	$k_1 \cdot 10^5$, с ⁻¹	$k_2 \cdot 10^4$, с ⁻¹	$m/V \cdot 10^2$, г/см ³	$k_1 \cdot 10^5$, с ⁻¹	$k_2 \cdot 10^4$, с ⁻¹	$m/V \cdot 10^2$, г/см ³	$k_1 \cdot 10^3$, с ⁻¹	$k_2 \cdot 10^4$, с ⁻¹
167,5	0,84	0,87	0,54	0,87	0,92	0,53	0,99	0,98	0,56
169,2	1,1	1,3	0,65	1,0	1,2	0,65	1,2	1,3	0,71
175,0	1,7	2,2	1,0	1,0	2,5	0,94	1,0	2,6	0,91
180,1	1,0	3,9	1,3	0,88	4,0	1,3	1,0	4,3	1,3
185,5	1,2	6,5	1,7	0,90	6,4	1,9	1,1	6,9	1,8

Таблица 2

Кинетические параметры констант скоростей термического разложения α-, β- и γ-НЦД

Константы	α-НЦД		β-НЦД		γ-НЦД	
	E, кДж/моль	log(A, с ⁻¹)	E, кДж/моль	log(A, с ⁻¹)	E, кДж/моль	log(A, с ⁻¹)
k_1	168,7±3,5	15,0±0,4	169,5±7,2	15,1±0,8	167,7±2,9	14,9±0,3
k_2	104,9±3,9	8,2±0,5	106,9±2,2	8,4±0,3	96,5±4,5	7,2±0,5

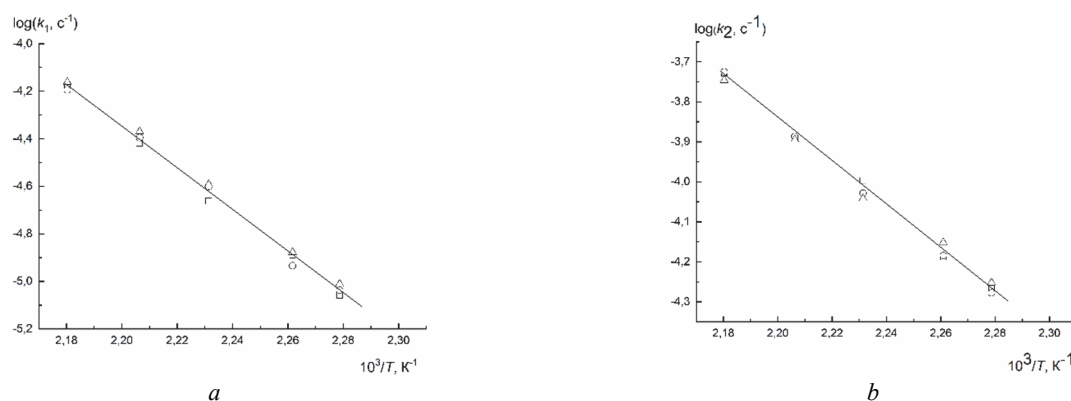


Рис. 3. Объединенная зависимость логарифма константы скорости некаталитической реакции $\log(k_1, \text{c}^{-1})$ (a) и $\log(k_2, \text{c}^{-1})$ (b) от обратной температуры $10^3/T, \text{K}^{-1}$ при термическом разложении α - (\square), β - (\circ) и γ -НЦД (Δ)

Fig. 3. Combined dependence of the logarithm of the rate constant of the non-catalytic reaction $\log(k_1, \text{s}^{-1})$ (a) and $\log(k_2, \text{s}^{-1})$ (b) on the reciprocal temperature $10^3/T, \text{K}^{-1}$ during thermal decomposition α - (\square), β - (\circ) and γ -NCD (Δ)

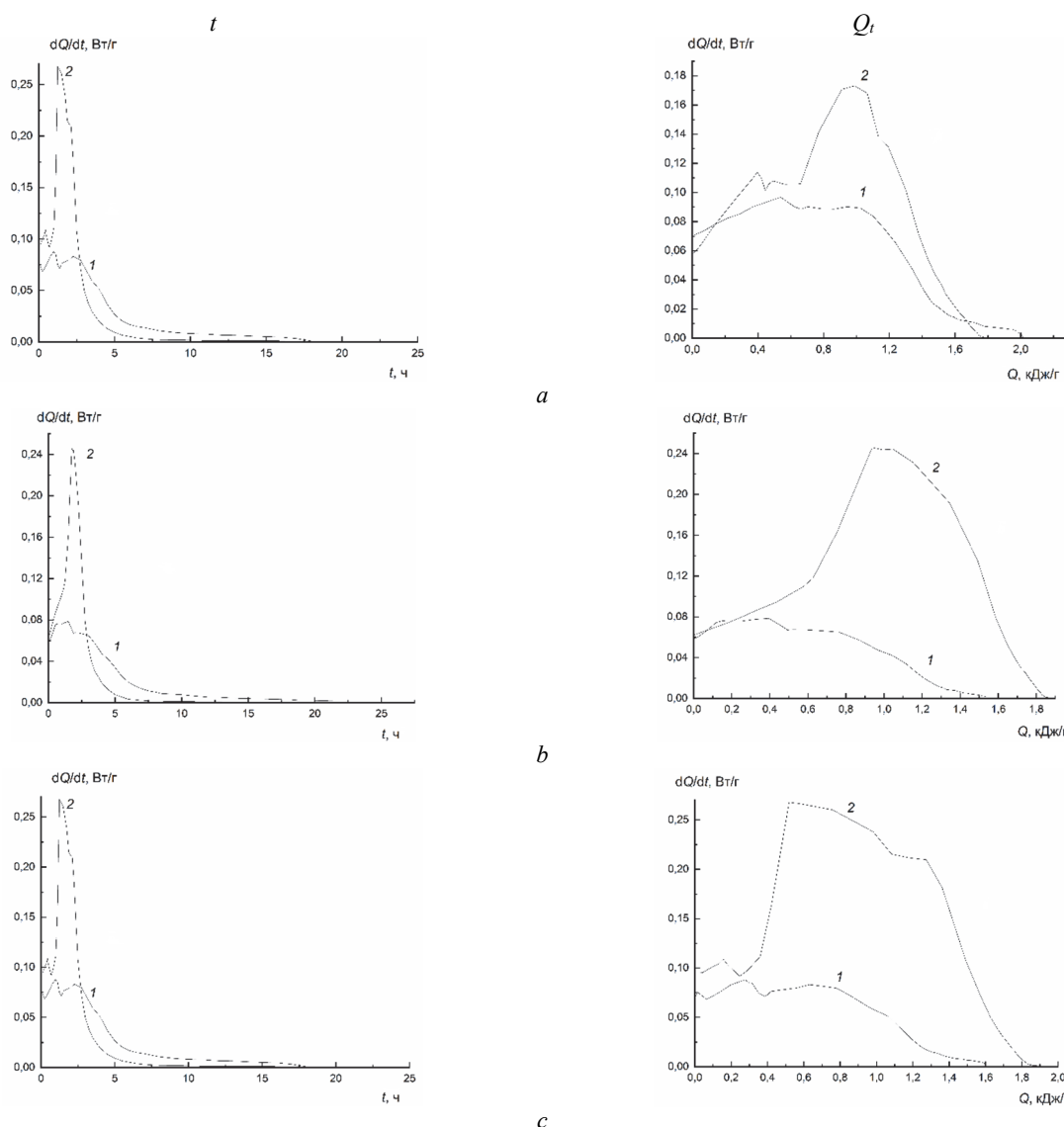


Рис. 4. Зависимости скорости тепловыделения $dQ/dt, \text{Вт} \cdot \text{г}^{-1}$ от времени ($t, \text{ч}$) и текущей теплоты реакции ($Q_r, \text{кДж} \cdot \text{г}^{-1}$) при термическом разложении в твердой фазе при температуре $180,1^\circ\text{C}$: α -НЦД (a) [$I - m/V = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $2 - m/V = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$]; β -НЦД (b) [$I - m/V = 8,8 \cdot 10^{-3}$; $2 - m/V = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$] и γ -НЦД (c) [$I - m/V = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $2 - m/V = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$]

Fig. 4. Dependences of the rate of heat release $dQ/dt, \text{W g}^{-1}$ on time (t, h) and the current heat of reaction ($Q_r, \text{kJ g}^{-1}$) during the thermal decomposition in the solid phase at temperature $180,1^\circ\text{C}$ of α -NCD (a) [$I - m/V = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $2 - m/V = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3$]; β -NCD (b) [$I - m/V = 8,8 \cdot 10^{-3}$; $2 - m/V = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3$] and γ -NCD (c) [$I - m/V = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $2 - m/V = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3$]

Для температурных зависимостей констант скоростей k_1 и k_2 при объединении данных по трем α -, β - и γ -НЦД получены выражения:

$$k_1 = 10^{15,0 \pm 0,4} \exp((-168,3 \pm 3,4) \cdot 10^3 / RT), \text{ c}^{-1},$$

$$k_2 = 10^{8,0 \pm 0,3} \exp((-102,7 \pm 2,2) \cdot 10^3 / RT), \text{ c}^{-1},$$

$$R = 8,314 \text{ Дж/моль град.}$$

НЦД являются представителями органических нитратов, поэтому логично, что механизм их разложения несущественно отличается от уже изученных аналогов. Анализ экспериментальных данных по кинетике реакции термического разложения нитратов спиртов и нитроцеллюлозы [24–26] показывает, что первичный акт этой реакции заключается в гомолитическом разрыве связи $-\text{CH}_2\text{O}-\text{NO}_2$, для большинства изученных соединений величина энергии активации начальной реакции находится в интервале 160–175 кДж/моль [27].

Величины активационных параметров начальной скорости разложения НЦД указывают на то, что их начальная реакция разложения подчиняется общим закономерностям разложения нитроэфиров. При увеличении величины отношения m/V примерно в 2 раза величина константы некаталитической реакции (k_1) остается примерно постоянной, а величина константы скорости каталитической реакции (k_2) также увеличивается примерно в 2 раза (рис. 4), что свиде-

тельствует об ускоряющем влиянии на скорость реакции разложения газообразных продуктов разложения. Основной причиной самоускорения является протекание окислительной и гидролитической реакции исходных НЦД с продуктами их разложения – NO_2 , HNO_3 и H_2O , энергия активации этих реакций ниже, чем для отрыва NO_2 .

Для оценки гарантийных сроков хранения лекарственных препаратов на основе нитратов циклодекстринов, исходя из полученных кинетических данных, рассчитаны времена достижения глубин разложения 0,02, 0,1 и 1% этих соединений при ряде температур из возможного температурного интервала хранения препаратов (табл. 3). Расчет проводили по формуле $t = k_2^{-1} \ln((a + k_1 / k_2) / ((1 - a)k_1 / k_2))$ для автокаталитической реакции первого порядка в предположении, что $\eta_0 = k_1/k_2 \ll 1$. В данной формуле величина a представляет собой глубину разложения, для которой рассчитывается время ее достижения.

Приведенные в табл. 3 значения рассчитаны для величины отношения m/V порядка $1 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$, поэтому являются нижней оценкой времени достижения данных глубин разложения для условий, когда данные препараты будут храниться в открытом виде, т.е. при бесконечно большом объеме, где вклад автокатализа газообразными продуктами в суммарную скорость разложения будет несуществен.

Таблица 3
Расчетное время достижения глубин превращения 0,02, 0,1 и 1% в реакции термического распада НЦД

T, °C	Гарантийный срок хранения, год		
	0,02%	0,1%	1%
0	59216	81405	113449
10	9191	13629	20104
20	1509	2482	3937
30	255	482	841
40	43,6	98,1	193
50	7,5	20,5	47,3
60	1,3	4,3	12,2

Оценка чувствительности к механическим воздействиям. В работе [1] нами были приведены данные по чувствительности к механическим воздействиям для НЦД с различными, но высокими степенями замещения (СЗ) гидроксильных групп. Показано, что чувствительность к механическим воздействиям тем ниже, чем ниже степень замещения гидроксильных групп на нитратные в исследуемом образце. Вместе с тем в указанной работе не приводятся данные по чувствительности низкозамещенных соединений.

В этой связи для исследуемых образцов НЦД были проведены измерения параметров чувствительности к удару и к трению. Было установлено, что различий между α -, β - и γ -НЦД не наблюдается, все рассматриваемые образцы не взрываются и не воспламеняются при

сбрасывании груза массой 10 кг с высоты 100 см и при давлении прижатия навески 1 000 МПа. Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемые НЦД не проявляют чувствительность к механическим воздействиям в максимально доступном формате измерений в соответствии с ГОСТ 4545-88 и ГОСТ Р 50835-95 и являются взрывобезопасными в обращении соединениями.

Заключение

Выполнены исследования в области чувствительности к механическим воздействиям, химической и термической стойкости нитратов α -, β - и γ -циклодекстринов, в молекулах которых содержатся по две нитратные группы.

Калориметрическим методом изучена кинетика термической деструкции исследуемых НЦД, установлено, что процесс термического разложения протекает в две стадии, для каждой из которых определены константы скорости и предэкспоненциальный множитель. Показано, что энергия активации первой стадии термической деструкции НЦД, содержащих 2 нитратные группы, близка к таковой для нитратов целлюлозы и составляет ~ 168 кДж/моль (~ 40 ккал/моль), что хорошо согласуется с литературными данными для первичного акта термического разложения нитроэфиров, а именно разрыва связи $-\text{CH}_2\text{O}-\text{NO}_2$.

Установленные закономерности термического распада НЦД и найденные константы позволили расчетным путем оценить гарантийный срок хранения исследуемых веществ в атмосфере воздуха для различных температур. Показано, что процесс разложения на глубину 0,02% при 25–30°C займет не менее 250 лет. Этот факт свидетельствует об их высокой химической стойкости и термической стабильности.

Установлено, что рассматриваемые в работе НЦД не чувствительны к удару – не взрываются и не воспламеняются при сбрасывании груза максимальной массой 10 кг с предельно возможной высоты 100 см и не чувствительны к трению при давлении прижатия навески НЦД 1000 МПа. На основании этих данных можно заключить, что исследованные НЦД являются взрывобезопасными в обращении соединениями.

Показано также, что природа НЦД, а именно количество глюкопиранозных циклов, не сказывается на их термической стабильности и взрывчатых свойствах.

В целом можно сделать вывод, что исследованные в работе НЦД являются взрывобезопасными, имеют высокую химическую и термическую стабильность и потенциально могут быть использованы для различного практического применения, в том числе в фармацевтике для создания новых лекарственных препаратов на их основе.

Список источников

1. Михайлов Ю.М., Гаранин В.А., Романова Л.Б., Рахимова М.А., Даровских А.В. Взрывчатые свойства нитратов циклодекстринов // *Физика горения и взрыва*. 2022. Т. 58, № 3. С. 133–140. doi: 10.15372/FGV20220314
2. US Pat. 6293201 (publ. 25.09.2001). Consaga J.P. Chemically reactive fragmentation warhead.
3. US Pat. 6468370 (publ. 22.10.2002). Blomquist H.R. Gas generating composition for vehicle occupant protection apparatus.
4. US Pat. 6527887 (publ. 04.03.2003). Ruebner A., Statton G.L., Consaga J.P. Polymeric cyclodextrinnitrate esters.
5. US Pat. 6673891 (publ. 06.01.2004). Stamler J.S., Toone E.J., Stack R.S. Polymers for delivering nitric oxide in vivo.
6. Михайлов Ю.М., Рахимова М.А., Романова Л.Б., Даровских А.В. О получении и свойствах нитратов циклодекстринов, сверхразветвленных полиглицидилов и некоторых других гидроксилсодержащих соединений // Сборник трудов Всероссийской конференции «Химия нитросоединений и родственных азот-кислородных систем» (АКС-2019). 2019. С. 15–18.
7. Михайлов Ю.М., Романова Л.Б., Рахимова М.А., Даровских А.В., Тарасов А.Е., Барина Л.С. Ковалев Д.Ю. О нитратах циклодекстринов и комплексов включения на их основе // *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*. 2023. № 2. С. 4–10.
8. Михайлов Ю.М., Романова Л.Б., Рахимова М.А., Климанова Е.Н., Файнгольд И.И. О комплексах включения на основе нитратов циклодекстринов и возможности использования их в качестве новых носителей лекарственных препаратов // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2023. № 3. С. 5–14. doi: 10.17223/7783494/3/1
9. Михайлов Ю.М., Бачурин С.О., Даровских А.В., Веселов И.М., Шевцов П.Н., Мальцев А.В., Шевцова Е.Ф. О комплексе включения нитрата γ -циклодекстрина с конъюгатом тетрогидрокарбазола и аминоксадамантина // *Доклады российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2024. Т. 517. С. 3–12. doi: 10.31857/S2686953524040019
10. Михайлов Ю.М., Даровских А.В., Барина Л.С., Ворожейкин М.И., Лукьянова А.А., Полетаева Д.А., Файнгольд И.И. Научные основы технологии получения и безопасности водорастворимых нитратов циклодекстринов лекарственного назначения // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2024. № 7. С. 5–13. doi: 10.17223/29491665/7/1
11. Михайлов Ю.М., Мальцев А.В., Бачурин С.О., Шевцова Е.Ф., Дубова Л.Г., Веселов И.М., Шевцов П.Н., Даровских А.В. Химико-биологические свойства нитратов циклодекстринов как потенциальных носителей фармакологических субстанций // *Изв. Академии наук. Серия химическая*. 2025. Т. 74, № 5. С. 1355–1362. doi: 10.1007/s11172-025-4631-5
12. Романова Л.Б., Барина Л.С., Лагодзинская Г.В., Казаков А.И., Михайлов Ю.М. Получение и анализ методом ЯМР нитратов бета-циклодекстрина // *Журнал прикладной химии*. 2014. Т. 87, № 12. С. 1809–1815. doi: 10.1134/S1070427214120155
13. Михайлов Ю.М., Романова Л.Б., Тарасов А.Е., Рахимова М.А., Даровских А.В., Барина Л.С. Исследование процесса получения нитратов циклодекстринов // *Журнал прикладной химии*. 2018. Т. 91, № 7. С. 1049–1054. doi: 10.1134/S1070427218070224
14. Simeček I. Stanovení organických nitrátů titrací siranem železnatým // *Przemysl Chemiczny*. 1957. V. 7 (32). P. 285–289.
15. Михайлов Ю.М., Романова Л.Б., Тарасов А.Е., Родин М.Д., Рахимова М.А., Даровских А.В., Барина Л.С. Синтез и методы анализа нитратов α -циклодекстрина // Сборник материалов VIII Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы». Черноголовка, 2016. С. 29.
16. Михайлов Ю.М., Романова Л.Б., Даровских А.В., Барина Л.С. Изучение процесса нитрования сверхразветвленных полиглицидилов // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92, № 3. С. 401–408. doi: 10.1134/S0044461819030162
17. ГОСТ 4545-88. Методы определения характеристик чувствительности к удару.
18. ГОСТ Р 50835-95. Методика определения характеристик чувствительности к трению при ударном сдвиге.
19. Гальперин Л.Н., Колесов Ю.Р., Машинов Л.Б. Дифференциальные автоматические калориметры (ДАК) различного назначения // Тезисы шестой Всесоюз. конф. по калориметрии. Тбилиси : Мецниереба, 1973. С. 539–543.

20. Назин Г.М., Казаков А.И., Набатова А.В., Волкова Н.Н., Шилов Г.В. Кинетика разложения 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (FOX-7). 6. Период индукции на ранних стадиях реакции в твердом состоянии // Химическая физика. 2024. Т. 43, № 7. С. 3–9. doi: 10.31857/S0207401X24070015
21. Казаков А.И., Лемперт Д.Б., Набатова А.В., Игнатиева Е.Л., Дашко Д.В., Разносчиков В.В., Яновский Л.С. Кинетика термического распада п-цианометильных производных 7-дифуранофуроксаноазепина и 7-трифураноазепина // Химическая физика. 2023. Т. 42, № 9. С. 3–10.
22. Рубцов Ю.И., Казаков А.И., Андриенко Л.П., Манелис Г.Б. Кинетика тепловыделения при термическом разложении целлюлозы // Физика горения и взрыва. 1993. № 6. С. 49–53.
23. Вагнер Дж.Г., Рао Ч.Н.Р., Моррисон Г.А. Химия нитро- и нитрозогрупп / пер. с англ.; под ред. Г. Фойера. М.: Мир, 1972. 536 с.
24. Манелис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И., Струнин В.А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1996. 233 с.
25. Waring C.E., Krastins G. The kinetics and mechanism of the thermal decomposition of nitroglycerin // Journal of Physical Chemistry. 1970. V. 74, № 5. P. 999–1006.
26. Лурье Б.А., Светлов Б.С. Химия и реакционная способность целлюлозы и ее производных // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по химии азотсодержащих гетероциклических соединений. Черноголовка: ИФХЧ, 1991. С. 1273–1279.
27. Лурье Б.А., Светлов Б.С. Кинетические характеристики первичной стадии термического распада органических нитратов // Кинетика и катализ. 1994. Т. 35, № 2. С. 165–175.

References

1. Mikhailov, Yu. M., Garanin, V.A., Romanova, L.B., Rakhimova, M.A. & Darovskikh, A.V. (2022) Explosive properties of cyclodextrin nitrates. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 58 (3). pp. 376–382. doi: 10.15372/FGV20220314
2. US Pat. 6293201 (publ. 25.09.2001). Consaga, J.P. Chemically reactive fragmentation warhead.
3. US Pat. 6468370 (publ. 22.10.2002). Blomquist, H.R. Gas generating composition for vehicle occupant protection apparatus.
4. US Pat. 6527887 (publ. 04.03.2003). Ruebner, A., Statton, G.L., Consaga, J.P. Polymeric cyclodextrinnitrate esters.
5. US Pat. 6673891 (publ. 06.01.2004). Stamlar, J.S., Toone, E.J., Stack, R.S. Polymers for delivering nitric oxide in vivo.
6. Mikhailov, Y.M., Rakhimova, M.A., Romanova, L.B. & Darovskikh, A.V. (2019) On the preparation and properties of nitrates of cyclodextrins, superbranched polyglycidols and some other hydroxyl-containing compounds. *Proceedings of the All-Russian Conference "Chemistry of nitro compounds and related nitrogen-oxygen systems" (ACS-2019)*, October 23–25, 2019 Moscow, Russia, pp. 15–18.
7. Mikhailov, Y.M., Romanova, L.B., Rakhimova, M.A., Darovskikh, A.V., Tarasov, A.E., Barinova, L.S. & Kovalev, D.Y. (2023) About nitrates of cyclodextrins and inclusion complexes on their basis. *Munitions and high-energy condensed systems*. 2. pp. 4–10.
8. Mikhailov, Yu.M., Darovskikh, A.V., Romanova, L.B., Rakhimova, M.A., Klimanova, E.N. & Faingold, I.I. (2023) Inclusion complexes based on cyclodextrin nitrates and the possibility of using them as new drug carriers. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti Life Safety / Security Technologies*. 3. pp. 5–14. doi: 10.17223/7783494/3/1 (In Russian)
9. Mikhailov, Y.M., Bachurin, S.O., Darovskikh, A.V., Veselov, I.M., Shevtsov, P.N., Maltsev, A.V., Shevtsova, E.F. (2024) Inclusion complex of γ -cyclodextrin nitrate with tetrahydrocarbazole and aminoadamantane conjugate. *Doklady Chemistry*. 517 (1). pp. 3–12. doi: 10.31857/S2686953524040019
10. Mikhailov, Yu.M., Darovskikh, A.V., Barinova, L.S., Vorozheikin, M.I., Lukyanova, A.A., Poletaeva, D.A. & Faingold, I.I. (2024) Scientific bases of technologies for synthesis and safety of water-soluble nitrates of cyclodextrins for medicinal purposes. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. Life Safety / Security Technologies*. 7. pp. 5–13 (In Russian). doi: 10.17223/29491665/7/1
11. Mikhailov, Yu. M., Maltsev, A.V., Bachurin, S.O., Shevtsova, E.F., Dubova, L.G., Veselov, I.M., Shevtsov, P.N. & Darovskikh, A.V. (2025) Chemical and biological properties of cyclodextrin nitrates as potential carriers of pharmacological substances. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Division of Chemical Science*. 74 (5). pp. 1355–1362. doi: 10.1007/s11172-025-4631-5
12. Romanova, L.B., Barinova, L.S., Lagodzinskaya, G.V., Kazakov, A.I. & Mikhailov, Yu.M. (2014) Preparation and NMR analysis of β -cyclodextrin nitrates. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 87. pp. 1884–1889 doi: 10.1134/S1070427214120155
13. Mikhailov, Y.M., Romanova, L.B., Tarasov, A.E., Rakhimova, M.A., Darovskikh, A.V. & Barinova, L.S. (2018) Preparation of Cyclodextrin Nitrates. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 91. pp. 1217–1221. doi: 10.1134/S1070427218070224
14. Simeček, I. (1957) Stanovení organických nitrátů titrcí siranem železnatým. *Przemysl Chemiczny*. 7 (32). pp. 285–289.
15. Mikhailov, Yu.M., Romanova, L.B., Tarasov, A.E., Rodin, M.D., Rakhimova, M.A., Darovskikh, A.V. & Barinova, L.S. (2019) Synthesis and methods of analysis of α -cyclodextrin nitrates. *Proceedings of the VIII All-Russian Conference Energy Condensed systems*. p. 29.
16. Mikhailov, Y.M., Romanova, L.B., Darovskikh, A.V. & Barinova, L.S. (2019) Study of nitration of hyperbranched polyglycidols. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 92 (3). pp. 445–452. doi: 10.1134/S0044461819030162
17. GOST 4545-88. Methods for determining the characteristics of impact sensitivity.
18. GOST R 50835-95. A method for determining the characteristics of sensitivity to friction during impact shear.
19. Galperin, L.N., Kolesov, Yu.R., & Mashkinov, L.B. (1973) Differential automatic calorimeters (DACs) for various purposes. *Theses of the sixth All-Union. Conference on calorimetry*. Tbilisi: Metsniereba Publ. pp. 539–543.
20. Nazin, G.M., Kazakov, A.I., Nabatova, A.V., Volkova, N.N. & Shilov, G.V. (2024) Kinetics of decomposition of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7). 6. The induction period at the early stages of the reaction in the solid state. *Himicheskaya Fizika*. 43 (7). pp. 3–9. doi: 10.31857/S0207401X24070015
21. Kazakov, A.I., Lempert, D.B., Nabatova, A.V., Ignatieva, E.L., Dashko, D.V., Raznoschikov, V.V. & Yanovskiy, L.S. (2023) Kinetics of the Thermal Decomposition of N-Allyl Derivatives of 7H-Difurazano-furazanoazepine and 7H-Trifurazanoazepine. *Himicheskaya Fizika*. 42 (5). pp. 3–10. doi: 10.31857/S0207401X23050047
22. Rubtsov, Yu.I., Kazakov, A.I., Andrienko, L.P. & Manelis, G.B. (1993) Kinetics of heat release during thermal decomposition of cellulose. *Physics of gorenje i explosion*. 6. pp. 49–53.

23. Wagner, J.G., Rao, C.N.R. & Morrison, G.A. (1972) Chemistry of nitro- and nitrosogroups, Translated from English / Edited by G. Feuer. Moscow: Mir. 536 p.
24. Manelis, G.B., Nazin, G.M., Rubtsov, Yu.I. & Strunin, V.A. (1996) Thermal decomposition and gorenje of explosives and powders. Moscow: Nauka, 233 p.
25. Waring, C.E. & Krastins, G. (1970) The kinetics and mechanism of the thermal decomposition of nitroglycerin. *Journal of Physical Chemistry*. 74 (5). pp. 999–1006.
26. Lurie, B.A. & Svetlov, B.S. (1991) Chemistry and reactivity of cellulose and its derivatives. Tez. dokl. Chernogolovka: IFKHCH. pp. 1273–1279 (In Russian)
27. Lurie, B.A. & Svetlov, B.S. (1994) Kinetic characteristics of the primary stage of thermal decomposition of organic nitrates. *Kinetics and catalysis*. 35 (2). pp. 165–175.

Информация об авторах:

Михайлов Юрий Михайлович – доктор химических наук, академик, главный научный сотрудник лаборатории энергетических полимерных систем Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия). E-mail: yumm@icp.ac.ru

Даровских Анна Владимировна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетических полимерных систем Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия). E-mail: avd@icp.ac.ru

Гаранин Виктор Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетических полимерных систем Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия).

Ворожейкин Михаил Игоревич – инженер лаборатории энергетических полимерных систем Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия).

Набатова Альбина Валентиновна – научный сотрудник лаборатории кинетической калориметрии Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия).

Казakov Анатолий Иванович – доктор химических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией кинетической калориметрии, главный научный сотрудник лаборатории кинетической калориметрии Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (Черноголовка, Россия). E-mail: akazakov@icp.ac.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Information about the authors:

Mikhailov Yuri M. – Dr.Sc. (Chemistry), academician, chief researcher of the laboratory of energetic polymer systems of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation). E-mail: yumm@icp.ac.ru

Darovskikh Anna V. – Cand.Sc. (Chemistry), senior researcher of the laboratory of energetic polymeric systems of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation). E-mail: avd@icp.ac.ru

Garanin Viktor A. – Cand.Sc. (Technical Sciences), senior researcher of the laboratory of energetic polymeric systems of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation)

Vorozheikin Mikhail I. – Engineer of the laboratory of energetic polymeric systems of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation)

Nabatova Albina V. – Researcher of laboratory of kinetic calorimetry of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation)

Kazakov Anatoly I. – Dr.Sc. (Chemistry), acting head of the laboratory of kinetic calorimetry, chief researcher of the laboratory of kinetic calorimetry of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka, Russian Federation). E-mail: akazakov@icp.ac.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025; принята к публикации 25.11.2025

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 21.11.2025; accepted for publication 25.11.2025

Научная статья
УДК 632.95
doi: 10.17223/29491665/9/2

Биопестициды как инструмент биоконтроля в сельском хозяйстве

Игорь Эдуардович Памирский¹, Александр Федорович Артеменко²,
Анжела Михайловна Асатунова³, Наталья Сергеевна Томашевич⁴, Кирилл Сергеевич Голохваст⁵

^{1, 2, 5} Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия

^{1, 5} Высшая инженерная школа агробиотехнологий, Томский государственный университет, Томск, Россия

^{3, 4} Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия

¹ pamirskiyie@sfscs.ru

² a.f.artemenko@mail.ru

³ biocontrol-vniibzr@yandex.ru

⁴ nataliatomashevich@yandex.ru

⁵ golokhvast@sfscs.ru

Аннотация. Активный рост населения мира повышает спрос на продукты питания. Это в свою очередь повышает использование удобрений и пестицидов, чтобы обеспечить стабильный и высокий урожай. Часть из них применяется бесконтрольно либо с нарушением агротехнологий. Несмотря на то, что классические пестициды загрязняют окружающую среду, мы не можем от них отказаться. Поэтому разработка новых экологических пестицидов является очень актуальной задачей. Одним из путей решения считается разработка и использование эффективных биопестицидов. Они имеют определённые преимущества над синтетическими пестицидами, но недостаток знаний о них пока не позволяет применять их более масштабно в сельском хозяйстве. Вопросам биологии и перспективам применения биопестицидов на основе микроорганизмов посвящен данный обзор. Рассматриваются основные моменты классификации, биологических эффектов, механизмов действия, особенностей применения биопестицидов на основе бактерий, микроскопических грибов, водорослей, вирусов, растительных экстрактов и вытяжек.

Ключевые слова: биопестициды, пестициды, бактерии, грибы, вирусы

Благодарности: работа выполнена в соответствии с грантом № 220-2961-3099 в рамках Постановления Правительства России № 220.

Для цитирования: Памирский И.Э., Артеменко А.Ф., Асатунова А.М., Томашевич Н.С., Голохваст К.С. Биопестициды как инструмент биоконтроля в сельском хозяйстве // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 15–27. doi: 10.17223/29491665/9/2

Original article
doi: 10.17223/29491665/9/2

Biopesticides as tools for biological control in agriculture

Igor E. Pamirsky¹, Alexander F. Artemenko², Angela M. Asaturova³, Natalia S. Tomashevich⁴,
Kirill S. Golokhvast⁵

^{1, 2, 5} Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
Krasnoobsk, Russian Federation

^{1, 5} Higher Engineering School of Agrobiotechnology, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{3, 4} Federal Research Center of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russian Federation

⁵ golokhvast@sfscs.ru

¹ pamirskiyie@sfscs.ru

² a.f.artemenko@mail.ru

³ biocontrol-vniibzr@yandex.ru

⁴ nataliatomashevich@yandex.ru

⁵ golokhvast@sfscs.ru

Abstract. The growing human population increases the demand for food production, leading to greater use of fertilizers and pesticides to ensure stable and high crop yields. Some of these substances are applied indiscriminately or in ways that do not comply with recommended agricultural practices. Although conventional pesticides pollute the environment, they cannot be abandoned at present.

Therefore, the development of new eco-friendly pesticides remains a pressing issue. One solution lies in designing and using efficient biopesticides. They offer certain advantages over synthetic pesticides, yet insufficient knowledge about them prevents their broader application in agriculture. This review focuses on the biological aspects and prospects of using microorganism-based biopesticides. Key points related to their classification, biological effects, mechanisms of action, and specific applications of bacterial-based, fungal-based, algal-based, viral-based, plant-extract-based, and infusion-based biopesticides are examined.

Keywords: biopesticides, pesticides, bacteria, fungi, viruses

Acknowledgments: The work was supported by grant No. 220-2961-3099 in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation No. 220.

For citation: Pamirsky, I.E., Artemenko, A.F., Asaturova, A.M., Tomashevich, N.S. & Golokhvast, K.S. (2025). Biopesticides as tools for biological control in agriculture. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 15–27. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/2

Введение

По оценкам исследователей, к 2050 г. население мира вырастет до 9,5–11 млрд человек, что приведет к высокому спросу на продукты питания [1–3]. Несмотря на то, что сельскохозяйственный сектор составляет одну треть мирового валового внутреннего продукта, из-за роста населения необходимо увеличивать урожайность и продуктивность почв, чтобы удовлетворить потребность в продуктах питания. С ростом производства сельскохозяйственной продукции неизбежно и пропорционально увеличивается использование удобрений и пестицидов, которые, к сожалению, являются загрязнителями окружающей среды.

Когда минеральные синтетические удобрения накапливаются в почве и растениях или смываются водой в сезон дождей, это приводит к загрязнению окружающих водоемов и почв. Кроме того, тяжелые металлы и радионуклиды присутствуют в химических удобрениях, которые трудно разлагаются, что делает их стойкими загрязнителями окружающей среды [4]. Широкое применение минеральных синтетических удобрений за последние несколько лет не только вызвало деградацию почвы, но и загрязнило почву и воду, что сказывается на качестве жизни растений, животных и человека. Одним из путей решения данных проблем является разработка новых видов удобрений. Большой интерес здесь представляют биоудобрения, в частности, удобрения на основе микроорганизмов. Например, микроорганизмы производят ряд внеклеточных ферментов, которые потенциально могут способствовать использованию органических источников азота и фосфора в почве [5]. Применение биоудобрений дает преимущества с экономической, социальной и экологической точек зрения [6].

Аналогичная проблема существует и при использовании пестицидов. Особый интерес вызывает класс биологических пестицидов – биопестицидов, представляющих собой различные биологические вещества или организмы. С точки зрения экологии биопестициды имеют большой плюс – в природе они

быстро распадаются и менее стабильны. У биопестицидов есть несколько недостатков: действуют медленнее, чем обычные химические пестициды (не помогут, если заражение вредителями серьезное и требует быстрой борьбы); на их действие влияют неблагоприятные условия внешней среды [7]. Тем не менее крупные и мелкие производители всё больше осознают преимущества использования биопестицидов и применяют их [8, 9]. Появляются различные комплексные подходы по расширению спектра активности биопестицидов (добавление присадок, смешивание разных штаммов, генетические модификации) [10]. Впервые сообщается о создании разлагаемых трехкомпонентных пролонгированных препаратов фунгицидов (на основе поли(3-гидроксibuтирата)) с различными механизмами действия активных веществ для подавления патогенов картофеля (*Phytophthora infestans*, *Alternaria longipes*, *Rhizoctonia solani* и *Fusarium solani*) [11]. Интересно то, что активно ведется работа по разработке технологии получения синтетических аналогов биопестицидов-молекул. В качестве примера можно привести модернизацию двухстадийной и препаративной «one-pot» методики синтеза 2,5-дифенилтиофена и его метокси- и бромпроизводных из соответствующих терминальных арилацетиленов, которые являются прекурсорами биопестицидов [12].

Для развития отрасли биопестицидов предлагается проводить работу в следующих направлениях [8]: 1) разработка высокопроизводительных моделей скрининга и биоанализа для быстрого отбора сильноточных штаммов биопестицидов; 2) расширение государственно-частного партнерства и разработка биопестицидов для борьбы с новыми и инвазивными вредителями; 3) расширение портфолио исследований переносчиков болезней животных и человека и расширение арсенала биопестицидов за счет биопестицидов на основе бактерий, энтомопатогенных нематод, эндофитов и вирусов; 4) использование преимуществ комплексной борьбы с вредителями и услуг по опылению; 5) оценка социально-экономических последствий использования биопестицидов и

информирование политиков для региональной гармонизации политики, позволяющей регистрировать и использовать биопестициды.

Ожидается, что при ежегодном совокупном темпе роста более 15% доля рынка биопестицидов сравняется с долей синтетических пестицидов в период с 2040 по 2050 г. [13, 14].

Нынешние исследования сложных микробных сообществ с использованием молекулярных инструментов показывают, что плодородная почва содержит как полезные, так и вредные организмы, которые действуют как посредники в растительных процессах [15, 16]. Однако размножение, популяция и распространение как полезных, так и патогенных микробов варьируется в зависимости от pH почвы, температуры, влажности и наличия питательных веществ [17].

Таким образом, понимание биологии бактерий в контексте изменения климата и абиотических стрессов является настоящей необходимостью использования полезных микробных взаимодействий в качестве малозатратной технологии для обеспечения устойчивости сельского хозяйства [18].

Биологический эффект биопестицидов

Пестициды классифицируют по нескольким признакам. По происхождению пестициды делят на синтетические и природные (биопестициды). Химические пестициды содержат большое количество классов веществ, содержащих хлор, фтор, ртуть, барий, серу, медь и другие элементы.

Современная классификация биопестицидов включает многоклеточные и микроорганизмы (в том числе генно-модифицированные организмы), вирусы, биохимические молекулы [19].

Отдельное место занимают нанопестициды, которые имеют размер от 1 до 100 нм и содержат вторичные метаболиты растений и опосредованные ими наноматериалы оксидов металлов [20]. Тем не менее сегодня биопестициды — это преимущественно различные микроорганизмы, прямо или косвенно подавляющие способность к жизнедеятельности других организмов. Микробные биопестициды пока не так широко распространены, как синтетические, но их рынок активно расширяется.

Биопестициды на основе микроорганизмов имеют разнообразные механизмы действия: подавление синтеза белка через связывание с 50S рибосомами прокариот, подавление трансляции белка через ингибирование связи аминоксил-тРНК с комплексами 30S и 70S рибосомных субъединиц, запуск неправильного биосинтеза белка (аномальный, нефункциональный белок), нарушение проницаемости мембран, подавление актив-

ности ферментов, блокирование электрической проводимости нерва, запуск нефизиологических реакций (утечка катионов калия, накопление аммиака) и др. [21].

Бактериальные биопестициды

Такие биопестициды состоят из живых или латентных клеток. Колонизация микробов на растениях может быть эпифитной, эндофитной или ризосферной [22].

Известен широкий спектр видов ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR – plant growth promoting rhizobacteria). PGPR относятся к родам *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospillum*, *Enterobacteriaceae* и другим [23]. PGPR увеличивают доступность питательных веществ, а также способность сельскохозяйственных растений поглощать питательные вещества [24]. В основном PGPR являются полезными, что позволило их применять в качестве биоудобрений, регуляторов болезней растений, а также пробиотиков [25].

Часто PGPR применяют для биоконтроля. Биоконтроль является экологически чистым подходом применения микроорганизмов для борьбы с болезнями растений. Биоконтроль PGPR основан на колонизации корней растений ризобактериями, конкуренции за питательные вещества, синтезе антибиотиков и литических ферментов, индукцию системной резистентности против патогенов.

Подавление болезней с помощью агентов биоконтроля, смягчение абиотических стрессов и биоремедиация поллютантов и загрязнителей являются косвенными механизмами, способствующими улучшению здоровья растений и повышению урожайности сельскохозяйственных культур [26–28]. Механизмы борьбы с заболеваниями растений включают синтез и секрецию сидерофоров, гидролитических ферментов, антибиотиков, летучих органических соединений, цианистого водорода и индукцию системной резистентности [29–32].

Косвенное благотворное воздействие этих PGPR вызывает подавление болезней и повышение устойчивости растений к стрессовым факторам [33]. Отмечено, что такие биоудобрения подавляют вредные почвенные патогены [34]. Например, рост и выживание ветивера возможно без внесения азота и фосфора, особенно в неплодородной почве, с помощью диазотрофов, в том числе рода *Pseudomonas* [35]. Отмечается, что некоторые виды бактерий, выделенные из ризосферы чайного растения, обладают антагонистической способностью по отношению к корневым возбудителям чайного растения [36]. В исследовании по выращиванию каучука, было показано, что ризобактерии проявляют антагонизм против белой корневой гнили и одновременно улучшают рост каучука [37].

Для защиты от действия стрессовых факторов, таких как холода, засухи, обводнение, инфекции патогенными микроорганизмами и воздействия тяжёлых металлов, растения синтезируют 1-амино-циклопропан-1-карбоксилат (далее АЦК), который является предшественником этилена [38]. Суть в том, что PGPR способны продуцировать фермент АЦК-деаминазу, которая участвует в основном в разложении этилена [39].

Исследователи выделили 26 штаммов из ризосферы растений фасоли обыкновенной, из которых большинство ингибировали рост патогенных грибов (*Sclerotinia*, *Fusarium* и *Rhizoctonia*) за счет продукции как летучих, так и нелетучих органических соединений, гидролитических ферментов, сидерофоров и противогрибкового липопептида [40]. Например, штамм *Bacillus* IcBac2.1 показал значительное ингибирование большинства фитопатогенов за счет продукции противогрибковых липопептидов. Точно так же штаммы *Alcaligenes* TvPs2.4 и *Pseudomonas* TvPs1.6 показали самое высокое ингибирование роста тестируемых фитопатогенов. Анализ SPME/GC-MS культуральных фильтратов позволил определить, что каждый штамм продуцировал 21 летучее органическое соединение, при этом была получена самая высокая концентрация соединений диметилдисульфида и D-лимонена.

Например, бактерии *Bacillus pumilus* способны подавить жизнедеятельность таких патогенов, как *Arthrobotrys conoides*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Rhizoctonia solani* и *Fagopyrum esculentum* [41]. Более того, синтез антибиотиков и литических ферментов ризобактериями является основным механизмом подавления патогенов и опосредованно стимулирует рост растений [42]. Обнаружена способность синтеза противогрибковых метаболитов, в том числе антибиотиков ряда феназинов, пирролнитрина, 2,4-диацетилфлороглюцинола, пиолетеорина, вискозинамида и тензина, многими ризобактериями [43], а также возможность синтеза литических ферментов, таких как хитиназа, целлюлаза, β -1,3-глюканаза, протеаза и липаза, которые вызывают лизис клеточной стенки фитопатогенных грибов [42, 44].

Стоит упомянуть, что кроме прямого воздействия на патогенный организм биопестициды могут стимулировать системную индуцированную устойчивость растения (не основана на передаче молекул-сигналов). Механизм системной индуцированной устойчивости включает передачу сигналов гормона, регулирующего рост и развитие растений – жасмоната внутри растения [45]. Помимо жасмоната и этилена, в качестве сигналов включаются и другие бактериальные молекулы, такие как О-антиген, являющийся

боковой полисахаридной цепью липополисахаридов в наружной мембране [46], летучие органические соединения, например бутандиол и ацетон (ацетил-метилкарбинол, 3-гидрокси-2-бутанон), высвобождающиеся при анаэробной ферментации [47], циклические липопептиды – поверхностно активные вещества [48].

Синтез ферментов и антибиотиков. Метаболическая активность любого организма регулируется активностью различных ферментов. Внеклеточные ферменты, выделяемые бактериями, археями и грибами в почве, вызывают деполимеризацию и минерализацию структурно сложных биомолекул. Активностью и синтезом этих ферментов можно управлять, чтобы облегчить секвестрацию углерода, биоремедиацию и стимулировать рост растений [49].

Например, было обнаружено, что производство литических ферментов (например, хитиназ, липаз, протеаз, целлюлаз и β -1,3-глюканаз) полезными микробами подавляет рост патогенных грибов, включая *Botrytis*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium*, *Phytophthora*, *Pythium* и *Fusarium* [50].

Штаммы *Pseudomonas* продуцируют хитиназу и целлюлазы и ингибируют рост *Pythium* и *Rhizoctonia* [51]. Установлено, что инокуляция PGPR предотвращает такие заболевания, как корневая гниль и пятнистость листьев куркумы [52], воротниковая гниль сои [53] и ранний ожог помидоров [54].

Сообщалось, что хитиназа является еще одним важным ферментом, защищающим растения от патогенов [55], и может быть получена из *Pseudomonas* и *Bacillus* [54]. Шестьдесят три бактериальных изолята, полученных из термитников, продемонстрировали способность уничтожать термитов в условиях чашки Петри, а продукция хитиназы, липазы и протеазы коррелировала с термитцидной активностью [56]. Недавно было обнаружено, что многие агенты биоконтроля подавляют различные заболевания растений наряду со стимуляцией роста и урожайности различных культур в тепличных и полевых условиях [57]. Из 90 эндофитных и ризосферных изолятов, полученных из выращенных в поле растений фасоли обыкновенной, 12 бактериальных штаммов, состоящих из *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. halotolerans*, *B. velezensis*, *Agrobacterium fabrum* и *Pseudomonas lini*, проявляли до 71% ингибирования *Fusarium* sp., *Macrophomina* sp. и *Alternaria* sp. на фасоли обыкновенной [58]. Биохимический анализ антагонистической и стимулирующей рост растений активности этих биоконтрольных штаммов выявил продукцию ксиланаз, хитиназ, сидерофоров, HCN, фосфатсольюбилизирующую активность и индол-3-уксусную кислоту.

Сложные взаимодействия между растением, окружающей средой и агентами биоконтроля являются причинами непоследовательности мероприятий в подавлении болезней и стимуляции роста растений [4].

Почва служит микробным пулом для роста и поддержания разнообразия организмов, в том числе комменсалов, патогенов и симбионтов [58]. С ростом популяции микробов также усиливается конкуренция за пищу и пространство, что приводит к адаптации разных видов микробов к разным стратегиям выживания и закрепления в определенной нише. Наиболее популярной стратегией выживания в условиях микробной конкуренции является производство антибиотиков [30, 59]. Антибиотики представляют собой низкомолекулярные гетерогенные соединения, токсичные в отношении конкурирующих микробных штаммов. Антибиотики могут быть как летучими (альдегиды, кетоны, спирты и сульфиды), так и нелетучими (фенилпиррол, циклические липопептидные аминопалиолы и гетероциклические азотсодержащие соединения). Антибиотики могут обладать антимикробной, противовирусной, антиоксидантной, противоопухолевой, антигельминтной, фитотоксической и/или цитотоксической активностью, а также могут действовать как стимуляторы роста растений в низких концентрациях. В ответ на антибиотики микробы развивают внутреннюю устойчивость к антибиотикам, поэтому штамм, продуцирующий антибиотики, и конкурирующий штамм с устойчивостью обеспечивают стратегии выживания [60]. Антибиотики ингибируют рост вредных организмов за счет деформации клеточной мембраны, ингибирования трансляции, остановки на стадии образования рибосомной РНК и ингибирования синтеза клеточной стенки [55].

Например, штаммы РР продуцируют различные типы антибиотиков, такие как 2,4-диацетилфлороглюцин, феназин-1-карбоновая кислота, феназин-1-карбоксамид, пиролуеорин, пирролнитрин, оомицин А, вискозинамид, бутироаминектон, кианоаминектон, зимимикролактон, зимикролактон А, рамнолипиды, цепациамида А, экомицины, псевдомоновая кислота, азомицин и цепафунгины, *микосубтилин*, *бацилломицин D*, *итурины*, *фенгицин*, *сурфактин*, *цвиттермицин А*, *пиолутеорин*, *массатолид А* и другие, которые успешно подавляют рост патогенных грибов, нематод [60–63].

Еще одним важным признаком активности биоконтроля со стороны PGPR является производство цианистого водорода и аммиака. Некоторые штаммы ризобактерий хорошо известны тем, что одновременно синтезируют как HCN, так и аммиак, оказывая синергетический эффект на рост растений [64]. Сообщалось, что HCN хелатирует ионы металлов, делает

фосфор доступным в почве, а также выступает в качестве высокотоксичного метаболита против роста фитопатогенов [65]. Показано, что штаммы, продуцирующие цианистый водород, вызывали увеличение скорости прорастания, длины корней и побегов дикого ячменя, ржи и пшеницы [66].

Ряд успешных биопестицидов (гербициды, инсектициды) основан на соединениях, продуцируемых почвенными актиномицетами [21]. Например, бластицидин, казугамицин, милдиомицин, натамицин, полиоксины, стрептомицин и валидамицин (широкий спектр фитопатогенов). Или авермектины, эмабектин, милбекмектин, g-эндотоксины *B. thuringiensis*, спиносад и полинактины эффективны в борьбе с насекомыми-вредителями.

Биопестициды на основе грибов

Микробиологические пестициды на основе грибов могут использоваться в защите растений от болезней, вредителей, нематод.

Грибы заражают насекомых путем прямого проникновения через кутикулы и производя большое количество гиф и биологически активные вторичные метаболиты, в конечном итоге вызывая гибель насекомых [21].

Например, вирулентные штаммы энтомопатогенных грибов, принадлежащие к родам *Metarhizium* sp. и *Beauveria* sp., относительно легко производить и применять в массовом порядке. Было обнаружено, что они являются одними из самых вирулентных против таких вредителей, как белокрылки, минеры (*Liriomyza* sp.), злаковые стеблевые мотыльки (*C. partellus* и *Busseola fusca*), ромбовидная моль *Plutella xylostella*, африканская совка *Helicoverpa armigera*, красный паутинный клещ *Tetranychus urticae*, томатный паутинный клещ *Tetranychus evansi*, тли, трипсы, дрозиды, стручковые мотыльки, стручковые жуки-хранители, ложная плодожорка *Thaumatotibia leucotreta* [8].

Триходерма – это эффективный фунгицид, который противостоит передающимся через почву микроскопическим грибам, таким как корневая гниль. Это особенно актуально для культур в засушливых районах, таких как зеленый грамм, арахис, черный грамм и нут, которые подвержены этим заболеваниям [67].

Инфекционный процесс обычно начинается с прорастания конидий или спор, вступивших в контакт с кутикулой хозяина. Благодаря комбинированному ферментативному и механическому действию, грибок проникает в тело хозяина; мицелий развивается внутри, часто образуя различные типы конидий или спор, колонизирующих хозяина. Во время вегетативного роста гриб может продуцировать и выделять

различные метаболиты, способствующие его росту или действующие как факторы вирулентности или токсины [68].

Биопестициды на основе водорослей

Многие микроорганизмы были исследованы на предмет их потенциала в разработке биопестицидов. Микроводоросли оказались отличным источником благодаря своим преимуществам перед традиционными химическими пестицидами [19]. Они производят множество соединений со стимулирующей активностью, включая биомассу и соединения, которые можно использовать при приготовлении биопестицидов, тем самым усиливая защиту растений [69].

В частности, цианобактерии считаются основными биологическими агентами борьбы с вредителями, которые контролируют различные заболевания растений [70]. Они производят различные биологически активные соединения против микроскопических грибов, нематод и других заболеваний. Они могут убивать целевых вредителей путем инактивации важных ферментов, разрушения цитоплазматических мембран и ингибирования синтеза белка.

Различные роды и виды микроводорослей являются потенциальными продуцентами вторичных метаболитов, которые можно использовать в сельском хозяйстве благодаря биоконтролирующим/пестицидным/инсектицидным свойствам [71].

Антибактериальной, противовирусной, противогрибковой, нематодной, инсектицидной, гербицидной, а также другим биологическим активностям посвящена недавняя обширная обзорная статья [72]. Авторы отмечают, что обширные исследования макро- и микроводорослей за последние десятилетия привели к открытию впечатляющего набора экстрактов и биоактивных соединений с пестицидным действием для применения в сельскохозяйственной практике.

Проводятся работы, направленные на объединение выращивания микроводорослей с очисткой сточных вод свиноферм для получения чистой воды и биопродуктов, в том числе пестицидов, в ответ на более экологичный подход к устойчивому сельскому хозяйству [73]. Исследователи обнаружили несколько макро- и микроводорослей, обладающих пестицидной активностью. Это видится рациональным и разумным подходом в рамках биоэкономики.

Биопестициды на основе вирусов

Другими важными микробными продуцентами пестицидов являются бакуловирусы, которые считаются видоспецифичными, их инфекционность свя-

зана с кристаллическими окклюзионными телами, активными против грызущих насекомых (гусениц чешуекрылых) [74]. Бакуловирусное окклюзионное тело представляет собой в основном вирион, который объединяется с токсином Bt для получения рекомбинантного бакуловируса (ColorBtrus), образуя окклюзионные тела, которые включают инсектицидный белок токсина Bt Cry1Ac для повышения скорости действия и патогенности по сравнению с его аналогом дикого типа.

Все бакуловирусы должны быть проглочены насекомыми, чтобы иметь какое-либо воздействие на них. Зараженное насекомое погибает от воздействия белка, экспрессируемого бакуловирусами, а не от самой вирусной инфекции [21]. Проглоченные окклюзионные тельца в среде средней кишки высвобождают специфические типы вирионов, называемые вирусами, происходящими из окклюзии (ODV), которые взаимодействуют непосредственно с мембраной микроворсинчатых эпителиальных клеток посредством действия белков их оболочки [68].

Бакуловирусы ограничены в борьбе с чешуекрылыми вредителями овощей, риса и хлопка. Производство их в больших масштабах было сложной задачей, поэтому их использование ограничено небольшими площадями [67]. Для расширения возможностей применения вирусов в качестве биопестицидов разрабатываются новые технологии их усовершенствования. Например, группа исследователей [75] разработала капсулу, которая защищает чувствительную вирусную ДНК от разрушения на солнце, но растворяется в щелочной среде кишечника насекомого, высвобождая вирус, который затем заражает и убивает вредителя. Авторы считают, что эта технология является очень многообещающим препаратом-кандидатом, применение которого в препаратах бакуловируса и других биопестицидов может значительно повысить стойкость и эффективность биопестицидов при одновременном снижении затрат.

Пестицидные свойства вирусов растений и разработки препаратов на их основе рассматриваются в работе [76].

Биопестициды на основе растительных экстрактов/вытяжек

Среди инновационных достижений в сельском хозяйстве важное место занимают регуляторы роста растений. Регуляторы роста, созданные на основе передовых научных достижений в химии, биологии, физиологии растений, биохимии, а также в знаниях о росте и развитии растений, обладают широким спектром физиологической активности, безопасной для

человека и окружающей среды [77]. Следует отметить, что в настоящее время мировой рынок все более ориентируется на природные регуляторы роста, полученные на основе растительного сырья; в частности, это экстракты морских водорослей и растений, обладающих иммуномодулирующими свойствами (биостимуляторы).

Растительные экстракты – это многокомпонентные препараты, реализация механизмов их действия не является суммой влияния единичных компонентов, а предполагается комплексное воздействие биоактивных компонентов [78, 79]. Растения способны выделять различные вещества, такие как никотин, азадирахтин, матрин, ротенон, вератрин, лимонен, пиретрин и другие [21]. Поэтому растет интерес к пониманию роли симбионтов в модулировании мультитрофических взаимодействий между растениями, вредителями и их естественными врагами, а также к изучению их роли в биологическом контроле [8]. Лучшие по качеству растительные экстракты получают благодаря использованию вместо органических растворителей так называемых «зеленых» растворителей, в частности диоксида углерода.

Выводы

При современных методах ведения сельского хозяйства пестициды снижают качество почв. Чрезмерное использование пестицидов также привело к серьезным опасностям для здоровья человека (люди получают отравления) и состояния окружающей среды (истощается биоразнообразие в природе).

С другой стороны, применение биопестицидов также требует рационального подхода. Например, опытным путем установлено, что биофунгициды (на основе бактерий и грибов) не только избирательно действуют на патогенные и условно патогенные грибы, но и угнетают развитие всех почвенных грибов [80].

Вопросы и принципы рационального и безопасного использования биопестицидов с точки зрения концепции зеленой химии в устойчивом сельском хозяйстве обсуждаются в обзоре [81].

Таким образом, одной из реальных альтернатив синтетическим пестицидам является использование биопестицидов на основе бактерий, грибов, водорослей, вирусов, а также растительных экстрактов и вытяжек. Разработка и применение новых биопестицидов является многообещающей стратегией.

Список источников

1. Rööß E., Bajželj B., Smith P. et al. Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures // Glob. Environ. Chang. 2017. Vol. 47. P. 1–12.
2. Gerland P., Raftery A.E., Ševčíková H., Li N. et al. World population stabilization unlikely this century // Science. 2014. Vol. 346, № 6206. P. 234–237. doi: 10.1126/science.1257469
3. Gu D., Andreev K., Dupre M.E. Major Trends in Population Growth Around the World // China CDC Weekly. 2021. Vol. 3, № 28. P. 604–613. doi: 10.46234/ccdcw2021.160
4. Kumar S., Diksha, Sindhu S.S. et al. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability // Current Research in Microbial Sciences. 2022. Vol. 3. P. 100094. doi: 10.1016/j.crmicr.2021.100094
5. Li J., Bao H., Xing W., Yang J. et al. Succession of fungal dynamics and their influence on physicochemical parameters during pig manure composting employing with pine leaf biochar // Bioresource Technology. 2020. Vol. 297. P. 122377. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122377
6. Parajuli S., Shrestha S., Subedi et al. Biopesticides: a sustainable approach for insect pest management // SAARC J. Agric. 2022. Vol. 20, № 1. P. 1–13. doi: 10.3329/sja.v20i1.60526
7. Khurshed A., Rather M.A., Jain V. et al. Plant based natural products as potential ecofriendly and safer biopesticides: A comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations and regulatory aspects // Microbial Pathogenesis. 2022. Vol. 173. P. 105854. doi: 10.1016/j.micpath.2022.105854
8. Akutse K.S., Nguya S.S., Manianiaet K. et al. Biopesticide Research and Product Development in Africa for Sustainable Agriculture and Food Security – Experiences From the International Centre of Insect Physiology and Ecology (icipe) // Front. Sustain. Food Syst. 2020. Vol. 4. P. 563016. doi: 10.3389/fsufs.2020.563016
9. Rajput V.S., Jhala J., Acharya V.S. Biopesticides and their mode of action against insect pests: A review // International Journal of Chemical Studies. 2020. Vol. 8. P. 2856–2862. doi: 10.22271/chemi.2020.v8.i2ar.9184
10. Максимов И.В., Максимова Т.И., Сарварова Е.Р. и соавт. Эндوفитные бактерии как агенты для биопестицидов нового поколения (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2018. Т. 54, № 2. С. 134–148.
11. Volova T.V., Kiselev E.G., Baranovskiy S.V. et al. Degradable Poly(3-hydroxybutyrate)-The Basis of Slow-Release Fungicide Formulations for Suppressing Potato Pathogens // Polymers. 2022. Vol. 14, № 17. P. 3669. doi: 10.3390/polym14173669
12. Кожич Д.Т., Слонская С.В., Арабей С.М. и соавт. Новые методики синтеза 2,5-дифенилтиофена и его производных как прекурсоров для получения синтетических аналогов биопестицидов // Защита растений. 2020. № 44. С. 212–219.
13. Olson S. An analysis of the biopesticide market now and where is going // Outlook. Pest Manag. 2015. Vol. 26. P. 203–206. doi: 10.1564/v26 oct 04
14. Dalmas C.A., Koutroubas S.D. Current status and recent developments in biopesticide use // Agriculture. 2018. Vol. 8, № 13. doi: 10.3390/agriculture8010013
15. Cassan F., Diaz-Zorita M. Azospirillum sp. in current agriculture: From the laboratory to the field // Soil Biol. Biochem. 2016. Vol. 103. P. 117–130.
16. Zipfel C., Oldroyd G.E.D. Plant signaling in symbiosis and immunity // Nature. 2017. Vol. 543. P. 328–336.

17. Msimbira L.A., Smith D.L. The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses // *Front. Sustain. Food Syst.* 2020. Vol. 4, № 106. doi: 10.3389/fsufs.2020.00106
18. Dubey R.K., Tripathi V., Kumar P. et al. Exploring rhizospheric interactions for agricultural sustainability: the need for integrative research on multi-trophic interactions // *J. Clean Prod.* 2016. Vol. 115. P. 3621–3665.
19. Kumar J., Ramlal Y., Mallick D. et al. An Overview of Some Biopesticides and Their Importance in Plant Protection for Commercial Acceptance // *Plants.* 2021. Vol. 10, № 6. P. 1185. doi: 10.3390/plants10061185
20. Hazafa A., Murad M., Masood M.U. et al. Nano-Biopesticides as an Emerging Technology for Pest Management // *Insecticides – impact and benefits of its use for humanity.* 2021. doi: 10.5772/intechopen.101285
21. Liu X., Cao A., Yan D. et al. Overview of mechanisms and uses of biopesticides // *International Journal of Pest Management.* 2019. Vol. 67, № 1. P. 65–72. doi: 10.1080/09670874.2019.1664789
22. Rossmann M., Sarango-Flores S.W., Chiaramonte J.B. et al. Plant microbiome: composition and functions in plant compartments // Pylro, V., Roesch, L. (eds) *The Brazilian Microbiome.* Springer, Cham. P. 7–20. doi: 10.1007/978-3-319-59997-7_2. 2017
23. Bhat B.A., Tariq L., Nissar S. et al. The role of plant-associated rhizobacteria in plant growth, biocontrol and abiotic stress management // *Journal of Applied Microbiology.* 2022. Vol. 133. P. 2717–2741. doi: 10.1111/jam.15796
24. Sah S., Krishnani S., Singh R. Pseudomonas mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security // *Current Research in Microbial Sciences.* 2021. Vol. 2. P. 100084. doi: 10.1016/j.crmicr.2021.100084
25. Aloo B.N., Tripathi V., Makumba B.A. et al. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future // *Front. Plant Sci.* 2022. Vol. 13. P. 1002448. doi: 10.3389/fpls.2022.1002448
26. Phour M., Sehwat A., Sindhu S.S. et al. Interkingdom signaling in plant-rhizomicrobiome interactions for sustainable agriculture // *Microbiol. Res.* 2020. Vol. 241, № 126589. P. 19.
27. Glick B.R., Gamalero E. Recent developments in the study of plant microbiomes // *Microorganisms.* 2021. Vol. 9. P. 1533. doi: 10.3390/microorganisms9071533
28. Zhang J., Cook J., Nearing J.T. et al. Harnessing the plant microbiome to promote the growth of agricultural crops // *Microbiol. Res.* 2021. Vol. 245, № 126690. P. 1–14.
29. Santoyo G., Orozco-Mosqueda M.C., Govindappa M. Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: a review // *Biocontr. Sci. Technol.* 2012. Vol. 22. P. 855–872.
30. Sehwat A., Sindhu S.S. Potential of biocontrol agents in plants disease control for improving food safety // *Def. Life Sci. J.* 2019. Vol. 4, № 4. P. 220–225.
31. Sharma R., Dahiya A., Sindhu S.S. Harnessing proficient rhizobacteria to minimize the use of agrochemicals // *Intern. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 2019. Vol. 7, № 10. P. 3186–3197.
32. Khanna K., Kohli S.K., Sharma P. et al. Antioxidant potential of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in agricultural crops infected with root-knot nematodes // Singh H.B., Vaishnav A., Sayyed R. (Eds.) *Antioxidants in plant-microbe interaction.* Springer Nature. 2021. doi: 10.1007/978-981-16-1350-0_16
33. Compant S., Clément C., Sessitsch A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization // *Soil Biology and Biochemistry.* 2010. Vol. 42, № 5. P. 669–678.
34. Wang H., Liu R., You M.P. et al. Pathogen Biocontrol Using Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR): Role of Bacterial Diversity // *Microorganisms.* 2021. Vol. 18, № 9. P. 1988. doi: 10.3390/microorganisms9091988
35. Chen X.W., Wong J., Wang J. et al. Vetiver grass-microbe interactions for soil remediation // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology.* 2021. Vol. 51. P. 897–938. doi: 10.1080/10643389.2020.1738193
36. Fauziah F., Setiawati M.R., Pranoto E. et al. Effect of indigenous microbes on growth and blister blight disease of tea plant // *Journal of Plant Protection Research.* 2019. Vol. 59, № 4. P. 529–534. doi: 10.24425/jppr.2019.131264
37. Chaihar M., Sujada N., Pathom-aree W. et al. Biological control of rigidoporus microporus the cause of white root disease in rubber using PGPRS in vivo // *Chiang Mai J. Sci.* 2019. Vol. 46, № 5. P. 850–866.
38. Van de Poel B., Van Der Straeten D. 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) in plants: more than just the precursor of ethylene! // *Front. Plant Sci.* 2014. Vol. 5, № 640. doi: 10.3389/fpls.2014.00640
39. Glick B.R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world // *Microbiological research.* 2014. Vol. 169, № 1. P. 30–39.
40. Memenza-Zegarra M., Zúñiga-Davila D. Bioprospection of native antagonistic rhizobacteria from the Peruvian coastal ecosystems associated with *Phaseolus vulgaris* // *Curr. Microbiol.* 2021. Vol. 78. P. 1418–1431. doi: 10.1007/s00284-021-02388-x
41. Dobrzyński J., Jakubowski Z., Kulkova I. et al. Biocontrol of fungal phytopathogens by *Bacillus pumilus* // *Front Microbiol.* 2023. Vol. 14. P. 1194606. doi: 10.3389/fmicb.2023.1194606
42. Ха Т.З., Канарский А.В., Канарская З.А. и соавт. Ключевой стимулятор роста растений – ризобактерии // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование.* 2020. № 3. С. 58–73.
43. Ahemad M., Kibret M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective // *Journal of King Saud University – Science.* 2014. Vol. 26, № 1. P. 1–20. doi: 10.1016/j.jksus.2013.05.001
44. Abbas A., Khan S.U., Khan W.U. et al. Antagonist effects of strains of *Bacillus* spp. against *Rhizoctonia solani* for their protection against several plant diseases: Alternatives to chemical pesticides // *Comptes Rendus Biologies.* 2019. Vol. 342, № 5. P. 124–135. doi: 10.1016/j.crv.2019.05.002
45. Pangesti N., Reichelt M., van de Mortel J.E. et al. Jasmonic Acid and Ethylene Signaling Pathways Regulate Glucosinolate Levels in Plants During Rhizobacteria-Induced Systemic Resistance Against a Leaf-Chewing Herbivore // *J. Chem. Ecol.* 2016. Vol. 42, № 12. P. 1212–1225. doi: 10.1007/s10886-016-0787-7
46. Kaneko H., Miyata F., Kurokawa M. et al. Diversity and characteristics of plant immunity-activating bacteria from Brassicaceae plants // *BMC Microbiol.* 2023. Vol. 23, № 175. doi: 10.1186/s12866-023-02920-y
47. Gouda S., Kerry R.G., Das G. et al. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture // *Microbiological Research.* 2018. Vol. 206. P. 131–140. doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016
48. Rigolet A., Arias A.A., Anckaert A. et al. The fate of bacterial secondary metabolites in the rhizosphere: *Streptomyces* degrades and feeds on cyclic lipopeptides produced by competitors // *bioRxiv.* 2023. Vol. 07, № 27. P. 550914. doi: 10.1101/2023.07.27.550914

49. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J. *et al.* Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions // Soil Biol. Biochem. 2013. Vol. 58. P. 216–234.
50. Hayat R, Ali S., Amara U., Khalid R. *et al.* Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review // Ann. Microbiol. 2010. Vol. 60, № 4. P. 579–598.
51. Bonaterra A., Badosa E., Daranas N. *et al.* Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases // Microorganisms. 2022. Vol. 10, № 9. P. 1759. doi: 10.3390/microorganisms10091759
52. Vinayarani G., Prakash H.S. Growth promoting rhizospheric and endophytic bacteria from *Curcuma longa* L. as biocontrol agents against rhizome rot and leaf blight diseases // Plant Pathol. J. 2018. Vol. 34, № 3. P. 218–235.
53. Irda S., Widya A. In vitro antagonism of five rhizobacterial species against *Athelia rolfsii* collar rot disease in soybean // Open Agriculture. 2018. Vol. 3. P. 264–272.
54. Babu A.N., Jogaiah S., Ito S. Improvement of growth, fruit weight and early blight disease protection of tomato plants by rhizosphere bacteria is correlated with their beneficial traits and induced biosynthesis of antioxidant peroxidase and polyphenol oxidase // Plant Sci. 2015. Vol. 231. P. 62–73.
55. Maksimov I.V., Abizgil'Dina R.R., Pusenkova L.I. Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens // Appl. Biochem. Microbiol. 2011. Vol. 47, № 4. P. 333–345.
56. Rakshiya Y.S., Verma M.K., Sindhu S.S. Efficacy of antagonistic soil bacteria in management of subterranean termites (Isoptera) // Res. Environ. Life Sci. 2016. Vol. 9. P. 949–955.
57. Sharma R., Sindhu S., Sindhu S.S. Suppression of *Alternaria* blight disease and plant growth promotion of mustard (*Brassica juncea* L.) by antagonistic rhizosphere bacteria // Appl. Soil Ecol. 2018. Vol. 129. P. 145–150.
58. Mendes R., Garbeva P., Raaijmakers J.M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic and human pathogenic microorganisms // FEMS Microbiol. Rev. 2013. Vol. 7, № 5. P. 634–663.
59. Jiao X., Takishita Y., Zhou G. *et al.* Plant associated rhizobacteria for biocontrol and plant growth enhancement // Front. Plant Sci. 2021. Vol. 17. doi: 10.3389/fpls.2021.634796
60. Nesme J., Simonet P. The soil resistome: a critical review of antibiotic resistance origins, ecology, and dissemination potential in telluric bacteria // Environ. Microbiol. 2015. Vol. 17, № 4. P. 913–930.
61. Hamid S., Lone R., Mohamed H.I. Production of Antibiotics from PGPR and Their Role in Biocontrol of Plant Diseases // Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management. 2021. P. 441–461. doi: 10.1007/978-3-030-66587-6_16
62. Sundaramoorthy S., Balabaskar P. Evaluation of combined efficacy of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* in managing tomato wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (FOL) // Plant Pathol. J. 2013. Vol. 12, № 4. P. 154–161.
63. Meyer S.L.F., Everts K.L., Gardener B.M. *et al.* Assessment of DAPG-producing *Pseudomonas fluorescens* for management of *Meloidogyne incognita* and *Fusarium oxysporum* on watermelon // J. Nematol. 2016. Vol. 48, № 1. P. 43–53.
64. Kumar A., Singh R., Yadav A. *et al.* Isolation and characterization of bacterial endophytes of *Curcuma longa* (L.) // 3 Biotech. 2016. Vol. 6, № 60. doi: 10.1007/s13205-016-0393-y
65. Rijavec T., Lapanje A. Hydrogen cyanide in the rhizosphere: not suppressing plant pathogens, but rather regulating availability of phosphate // Front. Microbiol. 2016. Vol. 7. P. 1785.
66. Heydari S., Moghadam P.R., Kennedy A.S.M. Hydrogen cyanide production ability by *Pseudomonas fluorescens* bacteria and their inhibition potential on weed germination // Proceedings “Competition for Resources in a Changing World: New Drive for Rural Development”. 7–9 October 2008. Tropentag. Hohenheim.
67. Samada L.H., Tambunan U.S.F. Biopesticides as Promising Alternatives to Chemical Pesticides: A Review of Their Current and Future Status // OnLine Journal of Biological Sciences. 2020. Vol. 20, № 2. P. 66–76. doi: 10.3844/ojbsci.2020.66.76
68. Ruii I. Microbial Biopesticides in Agroecosystems // Agronomy. 2018. Vol. 8, № 11. P. 235. doi: 10.3390/agronomy8110235
69. Ranglová K., Lakatos G.E., Manoel J.A.C. *et al.* Growth, biostimulant and biopesticide activity of the MACC-1 *Chlorella* strain cultivated outdoors in inorganic medium and wastewater // Algal Res. 2021. Vol. 53. doi: 10.1016/j.algal.2020.102136
70. Thirumurthy P., Mol I. Micro-algae as bio-pesticides for the development of sustainable agriculture // Wide Spectrum. 2020. Vol. 8, № 6. P. 5–22.
71. Costa J.A.V., Freitas B.C.B., Cruz C.G. *et al.* Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development // Journal of Environmental Science and Health. 2019. Part B. Vol. 54, № 5. P. 366–375. doi: 10.1080/03601234.2019.1571366
72. Asimakis E., Shehata A.A., Eisenreich W. *et al.* Algae and Their Metabolites as Potential Bio-Pesticides // Microorganisms. 2022. Vol. 10, № 2. doi: 10.3390/microorganisms10020307
73. Ferreira A., Melkonyan L., Carapinha S. *et al.* Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggy wastewater // Environmental Advances. 2021. Vol. 4, № 100062. doi: 10.1016/j.envadv.2021.100062
74. Chang J.H., Choi J.Y., Jin B.R. *et al.* An improved baculovirus insecticide producing occlusion bodies that contain *Bacillus thuringiensis* insect toxin // J. Invertebr. Pathol. 2003. Vol. 84. P. 30–37. doi: 10.1016/S0022-2011(03)00121-6
75. Wilson K., Grzywacz D., Curcio I. *et al.* A novel formulation technology for baculoviruses protects biopesticide from degradation by ultraviolet radiation // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, № 13301. doi: 10.1038/s41598-020-70293-7
76. Marwal A., Srivastava A.K., Gaur R.K. Chapter 8 – Plant viruses as biopesticides New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering // Sustainable Agriculture: Advances in Microbe-based Biostimulants. 2022. P. 181–194. doi: 10.1016/B978-0-323-85577-8.00002-0
77. Синяшин О.Г., Шаповал А.О., Шулаева М.М. Инновационные регулятор роста растений в сельскохозяйственном производстве // Плодородие. 2016. № 5. С. 38–42.
78. He S.L., Wang S.Q., Wang Q.Y. Allelochemicals as growth regulators: A review // Allelopathy Journal. 2019. Vol. 48. P. 15–26.
79. Ali Q., Shehzad F., Waseem M., Perveen R. Plant-based biostimulants and plant stress responses (Book Chapter) // Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives. Springer, 2020. P. 625–661.
80. Колесникова И.Я., Воронин Л.В. Влияние биопестицидов на комплексы почвенных микромицетов в агроценозах // Экосистемы. 2019. № 18. С. 97–107.

81. Fenibo E.O., Ijoma G.N., Matambo T. Biopesticides in Sustainable Agriculture: A Critical Sustainable Development Driver Governed by Green Chemistry Principles // *Front. Sustain. Food Syst. Sec. Agroecology and Ecosystem Services*. 2021. Vol. 5. doi: 10.3389/fsufs.2021.619058

References

1. Rööß, E., Bajželj, B., Smith, P. et al. (2017) Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Glob. Environ. Chang.* 47. pp. 1–12.
2. Gerland, P., Raftery, A.E., Ševčíková, H., Li, N. et al. (2014) World population stabilization unlikely this century. *Science*. 346 (6206). pp. 234–237. doi:10.1126/science.1257469.
3. Gu, D., Andreev, K. & Dupre, M.E. (2021) Major Trends in Population Growth Around the World. *China CDC Weekly*. 3 (28). pp. 604–613. doi:10.46234/ccdcw2021.160.
4. Kumar, S., Diksha, Sindhu S.S. et al. (2022) Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*. 3. p. 100094. doi:10.1016/j.crmicr.2021.100094
5. Li, J., Bao, H., Xing, W., Yang, J. et al. (2020) Succession of fungal dynamics and their influence on physicochemical parameters during pig manure composting employing with pine leaf biochar. *Bioresource Technology*. 297. p. 122377. doi:10.1016/j.biortech.2019.122377
6. Parajuli, S., Shrestha, S., Subedi et al. (2022) Biopesticides: a sustainable approach for insect pest management. *SAARC J. Agric.* 20 (1). pp. 1–13. doi:10.3329/sja.v20i1.60526
7. Khursheed, A., Rather, M.A., Jain, V. et al. (2022) Plant based natural products as potential ecofriendly and safer biopesticides: A comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations and regulatory aspects. *Microbial Pathogenesis*. 173. p. 105854. doi:10.1016/j.micpath.2022.105854
8. Akutse, K.S., Nguya, S.S., Maniania, K. et al. (2020) Biopesticide Research and Product Development in Africa for Sustainable Agriculture and Food Security – Experiences From the International Centre of Insect Physiology and Ecology (icipe). *Front. Sustain. Food Syst.* 4. p. 563016. doi:10.3389/fsufs.2020.563016
9. Rajput, V.S., Jhala, J. & Acharya, V.S. (2020) Biopesticides and their mode of action against insect pests: A review. *International Journal of Chemical Studies*. 8. pp. 2856–2862. doi:10.22271/chemi.2020.v8.i2ar.9184
10. Maksimov, I.V., Maksimova, T.I., Sarvarova, E.R., Blagova, D.K. & Popov, V.O. (2018) Endophytic Bacteria As Effective Agents Of New-Generation Biopesticides (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*. 54 (2). pp. 128–140.
11. Volova, T.V., Kiselev, E.G., Baranovskiy, S.V. et al. (2022) Degradable Poly(3-hydroxybutyrate)-The Basis of Slow-Release Fungicide Formulations for Suppressing Potato Pathogens. *Polymers (Basel)*. 14 (17). p. 3669. doi:10.3390/polym14173669
12. Kozhich, D.T., Slonskaya, C.V., Arabey, S.M. et al. (2020) New Methods Of 2,5-Diphenylthiophene And Its Derivatives Synthesis As Precursors For Getting The Synthetic Biopesticides Analogues. *Zashchita rasteniy*. 44. pp. 212–219.
13. Olson, S. (2015) An analysis of the biopesticide market now and where is going. *Outlook. Pest Manag.* 26. pp. 203–206. doi:10.1564/v26 oct 04
14. Dalmas, C.A. & Koutroubas, S.D. (2018) Current status and recent developments in biopesticide use. *Agriculture*. 8 (13). doi:10.3390/agriculture8010013.
15. Cassan, F. & Diaz-Zorita, M. (2016) Azospirillum sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. *Soil Biol. Biochem.* 103. pp. 117–130.
16. Zipfel, C. & Oldroyd, G.E.D. (2017) Plant signaling in symbiosis and immunity. *Nature*. 543. pp. 328–336.
17. Msimbira, L.A. & Smith, D.L. (2020) The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses. *Front. Sustain. Food Syst.* 4 (106). doi:10.3389/fsufs.2020.00106
18. Dubey, R.K., Tripathi, V., Kumar, P. et al. (2016) Exploring rhizospheric interactions for agricultural sustainability: the need for integrative research on multi-trophic interactions. *J. Clean Prod.* 115. pp. 3621–3665.
19. Kumar, J., Ramlal, Y., Mallick, D. et al. (2021) An Overview of Some Biopesticides and Their Importance in Plant Protection for Commercial Acceptance. *Plants (Basel)*. 10 (6). p. 1185. doi:10.3390/plants10061185
20. Hazafa, A., Murad, M., Masood, M.U. et al. (2021) Nano-Biopesticides as an Emerging Technology for Pest Management. In: *Insecticides – impact and benefits of its use for humanity*. doi:10.5772/intechopen.101285
21. Liu, X., Cao, A., Yan, D. et al. (2019) Overview of mechanisms and uses of biopesticides. *International Journal of Pest Management*. 67 (1) pp. 65–72. doi:10.1080/09670874.2019.1664789
22. Rossmann, M., Sarango-Flores, S.W., Chiamonte, J.B. et al. (2017) Plant microbiome: composition and functions in plant compartments. In: Pylro, V., Roesch, L. (eds) *The Brazilian Microbiome*. Springer, Cham. pp. 7–20. doi:10.1007/978-3-319-59997-7 2
23. Bhat, B.A., Tariq, L., Nissar, S. et al. (2022) The role of plant-associated rhizobacteria in plant growth, biocontrol and abiotic stress management. *Journal of Applied Microbiology*. 133. pp. 2717–2741. doi:10.1111/jam.15796
24. Sah, S., Krishnani, S. & Singh, R. (2021) Pseudomonas mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*. 2. p. 100084. doi:10.1016/j.crmicr.2021.100084
25. Aloo, B.N., Tripathi, V., Makumba, B.A. et al. (2022) Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Front. Plant Sci.* 13. p. 1002448. doi:10.3389/fpls.2022.1002448
26. Phour, M., Sehrawat, A., Sindhu, S.S. et al. (2020) Interkingdom signaling in plant-rhizomicrobiome interactions for sustainable agriculture. *Microbiol. Res.* 241 (126589). p. 19.
27. Glick, B.R. & Gamalaro, E. (2021) Recent developments in the study of plant microbiomes. *Microorganisms*. 9. p. 1533. doi:10.3390/microorganisms9071533
28. Zhang, J., Cook, J., Nearing, J.T. et al. (2021) Harnessing the plant microbiome to promote the growth of agricultural crops. *Microbiol. Res.* 245 (126690). pp. 1–14.
29. Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M.C. & Govindappa, M. (2012) Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of Bacillus and Pseudomonas: a review. *Biocontr. Sci. Technol.* 22. pp. 855–872.
30. Sehrawat, A. & Sindhu, S.S. (2019) Potential of biocontrol agents in plants disease control for improving food safety. *Def. Life Sci. J.* 4 (4). pp. 220–225.

31. Sharma, R., Dahiya, A. & Sindhu, S.S. (2019) Harnessing proficient rhizobacteria to minimize the use of agrochemicals. *Intern. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 7 (10). pp. 3186–3197.
32. Khanna, K., Kohli, S.K., Sharma, P. et al. (2021) Antioxidant potential of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in agricultural crops infected with root-knot nematodes. In: Singh H.B., Vaishnav A., Sayyed R. (Eds.) *Antioxidants in plant-microbe interaction*. Springer Nature. doi:10.1007/978-981-16-1350-0_16
33. Compant, S., Clément, C. & Sessitsch, A. (2010) Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 42 (5). pp. 669–678.
34. Wang, H., Liu, R., You, M.P. et al. (2021) Pathogen Biocontrol Using Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR): Role of Bacterial Diversity. *Microorganisms*. 18 (9). p. 1988. doi:10.3390/microorganisms9091988
35. Chen, X.W., Wong, J., Wang, J. et al. (2021) Vetiver grass-microbe interactions for soil remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 51. pp. 897–938. doi:10.1080/10643389.2020.1738193
36. Fauziah, F., Setiawati, M.R., Pranoto, E. et al. (2019) Effect of indigenous microbes on growth and blister blight disease of tea plant. *Journal of Plant Protection Research*. 59 (4). pp. 529–534. doi:10.24425/jppr.2019.131264
37. Chaihar, M., Sujada, N., Pathom-aree, W. et al. (2019) Biological control of rigidoporus microporus the cause of white root disease in rubber using PGPRS in vivo. *Chiang Mai J. Sci.* 46 (5). pp. 850–866.
38. Van de Poel, B. & Van Der Straeten, D. (2014) 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) in plants: more than just the precursor of ethylene! *Front. Plant Sci.* 5 (640). doi:10.3389/fpls.2014.00640
39. Glick, B.R. (2014) Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological research*. 169 (1). pp. 30–39.
40. Memenza-Zegarra, M. & Zúniga-Davila, D. (2021) Bioprospection of native antagonistic rhizobacteria from the Peruvian coastal ecosystems associated with Phaseolus vulgaris. *Curr. Microbiol.* 78. pp. 1418–1431. doi:10.1007/s00284-021-02388-x
41. Dobrzyński, J., Jakubowska, Z., Kulkova, I. et al. (2023) Biocontrol of fungal phytopathogens by Bacillus pumilus. *Front Microbiol.* 14. p. 1194606. doi:10.3389/fmicb.2023.1194606
42. Kha, T.Z., Kanarskiy, A.V., Kanarskaya, Z.A. et al. (2020) The Key Plant Growth Stimulator – Rhizobacteria. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 3. pp. 58–73. (In Russian)
43. Ahemad, M. & Kibret, M. (2014) Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University – Science*. 26 (1). pp. 1–20. doi:10.1016/j.jksus.2013.05.001
44. Abbas, A., Khan, S.U., Khan, W.U. et al. (2019) Antagonist effects of strains of Bacillus spp. against Rhizoctonia solani for their protection against several plant diseases: Alternatives to chemical pesticides. *Comptes Rendus Biologies*. 342 (5). pp. 124–135. doi:10.1016/j.crv.2019.05.002
45. Pangesti, N., Reichelt, M., van de Mortel, J.E. et al. (2016) Jasmonic Acid and Ethylene Signaling Pathways Regulate Glucosinolate Levels in Plants During Rhizobacteria-Induced Systemic Resistance Against a Leaf-Chewing Herbivore. *J. Chem. Ecol.* 42 (12). pp. 1212–1225. doi:10.1007/s10886-016-0787-7
46. Kaneko, H., Miyata, F., Kurokawa, M. et al. (2023) Diversity and characteristics of plant immunity-activating bacteria from Brassicaceae plants. *BMC Microbiol.* 23 (175). doi:10.1186/s12866-023-02920-y
47. Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G. et al. (2018) Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research*. 206. pp. 131–140. doi:10.1016/j.micres.2017.08.016
48. Rigolet, A., Arias, A.A., Anckaert, A. et al. (2023) The fate of bacterial secondary metabolites in the rhizosphere: Streptomyces degrades and feeds on cyclic lipopeptides produced by competitors. *bioRxiv*. 07 (27). p. 550914. doi:10.1101/2023.07.27.550914
49. Burns, R.G., DeForest, J.L., Marxsen, J. et al. (2013) Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biol. Biochem.* 58. pp. 216–234.
50. Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R. et al. (2010) Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann. Microbiol.* 60 (4). pp. 579–598.
51. Bonaterra, A., Badosa, E., Daranas, N. et al. (2022) Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases. *Microorganisms*. 10 (9). p. 1759. doi:10.3390/microorganisms10091759
52. Vinayarani, G. & Prakash, H.S. (2018) Growth promoting rhizospheric and endophytic bacteria from Curcuma longa L. as biocontrol agents against rhizome rot and leaf blight diseases. *Plant Pathol. J.* 34 (3). pp. 218–235.
53. Irda, S. & Widya, A. (2018) In vitro antagonism of five rhizobacterial species against Athelia rolfsii collar rot disease in soybean. *Open Agriculture*. 3. pp. 264–272.
54. Babu, A.N., Jogaiah, S. & Ito, S. (2015) Improvement of growth, fruit weight and early blight disease protection of tomato plants by rhizosphere bacteria is correlated with their beneficial traits and induced biosynthesis of antioxidant peroxidase and polyphenol oxidase. *Plant Sci.* 231. pp. 62–73.
55. Maksimov, I.V., Abizgil'Dina, R.R. & Pusenkova, L.I. (2011) Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens. *Appl. Biochem. Microbiol.* 47 (4). pp. 333–345.
56. Rakshiya, Y.S., Verma, M.K. & Sindhu, S.S. (2016) Efficacy of antagonistic soil bacteria in management of subterranean termites (Isoptera). *Res. Environ. Life Sci.* 9. pp. 949–955.
57. Sharma, R., Sindhu, S. & Sindhu, S.S. (2018) Suppression of Alternaria blight disease and plant growth promotion of mustard (Brassica juncea L.) by antagonistic rhizosphere bacteria. *Appl. Soil Ecol.* 129. pp. 145–150.
58. Mendes, R., Garbeva, P. & Raaijmakers, J.M. (2013) The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiol. Rev.* 7 (5). pp. 634–663.
59. Jiao, X., Takishita, Y., Zhou, G. et al. (2021) Plant associated rhizobacteria for biocontrol and plant growth enhancement. *Front. Plant Sci.* 17. doi:10.3389/fpls.2021.634796
60. Nesme, J. & Simonet, P. (2015) The soil resistome: a critical review of antibiotic resistance origins, ecology, and dissemination potential in telluric bacteria. *Environ. Microbiol.* 17 (4). pp. 913–930.
61. Hamid, S., Lone, R. & Mohamed, H.I. (2021) Production of Antibiotics from PGPR and Their Role in Biocontrol of Plant Diseases. In: *Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management*. pp. 441–461. doi:10.1007/978-3-030-66587-6_16

62. Sundaramoorthy, S. & Balabaskar, P. (2013) Evaluation of combined efficacy of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* in managing tomato wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (FOL). *Plant Pathol. J.* 12 (4). pp. 154–161.
63. Meyer, S.L.F., Everts, K.L., Gardener, B.M. et al. (2016) Assessment of DAPG-producing *Pseudomonas fluorescens* for management of *Meloidogyne incognita* and *Fusarium oxysporum* on watermelon. *J. Nematol.* 48 (1). pp. 43–53.
64. Kumar, A., Singh, R., Yadav, A. et al. (2016) Isolation and characterization of bacterial endophytes of *Curcuma longa* (L.). *3 Biotech.* 6 (60). doi:10.1007/s13205-016-0393-y
65. Rijavec, T. & Lapanje, A. (2016) Hydrogen cyanide in the rhizosphere: not suppressing plant pathogens, but rather regulating availability of phosphate. *Front. Microbiol.* 7. p. 1785.
66. Heydari, S., Moghadam, P.R. & Kennedy, A.S.M. (2008) Hydrogen cyanide production ability by *Pseudomonas fluorescens* bacteria and their inhibition potential on weed germination. In: Proceedings “Competition for Resources in a Changing World: New Drive for Rural Development”. 7-9 October 2008. Tropentag. Hohenheim.
67. Samada, L.H. & Tambunan, U.S.F. (2020) Biopesticides as Promising Alternatives to Chemical Pesticides: A Review of Their Current and Future Status. *OnLine Journal of Biological Sciences.* 20 (2). pp. 66–76. doi:10.3844/ojbsci.2020.66.76
68. Ruiu, I. (2018) Microbial Biopesticides in Agroecosystems. *Agronomy.* 8 (11). p. 235. doi:10.3390/agronomy8110235
69. Ranglová, K., Lakatos, G.E., Manoel, J.A.C. et al. (2021) Growth, biostimulant and biopesticide activity of the MACC-1 *Chlorella* strain cultivated outdoors in inorganic medium and wastewater. *Algal Res.* 53. doi:10.1016/j.algal.2020.102136
70. Thirumurthy, P. & Mol, I. (2020) Micro-algae as bio-pesticides for the development of sustainable agriculture. *Wide Spectrum.* 8 (6). pp. 5–22.
71. Costa, J.A.V., Freitas, B.C.B., Cruz, C.G. et al. (2019) Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development. *Journal of Environmental Science and Health. Part B.* 54 (5). pp. 366–375. doi:10.1080/03601234.2019.1571366
72. Asimakis, E., Shehata, A.A., Eisenreich, W. et al. (2022) Algae and Their Metabolites as Potential Bio-Pesticides. *Microorganisms.* 10 (2). doi:10.3390/microorganisms10020307.
73. Ferreira, A., Melkonyan, L., Carapinha, S. et al. (2021) Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances.* 4. No. 100062. doi:10.1016/j.envadv.2021.100062
74. Chang, J.H., Choi, J.Y., Jin, B.R. et al. (2003) An improved baculovirus insecticide producing occlusion bodies that contain *Bacillus thuringiensis* insect toxin. *J. Invertebr. Pathol.* 84. pp. 30–37. doi:10.1016/S0022-2011(03)00121-6
75. Wilson, K., Grzywacz, D., Curcic, I. et al. (2020) A novel formulation technology for baculoviruses protects biopesticide from degradation by ultraviolet radiation. *Sci. Rep.* 10. No. 13301. doi:10.1038/s41598-020-70293-7
76. Marwal, A., Srivastava, A.K. & Gaur, R.K. (2022) Chapter 8 – Plant viruses as biopesticides New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. In: *Sustainable Agriculture: Advances in Microbe-based Biostimulants*. pp. 181–194. doi:10.1016/B978-0-323-85577-8.00002-0
77. Sinyashin, O.G., Shapoval, A.O. & Shulaeva, M.M. (2016) Innovative Plant Growth Regulators In Agricultural Production. *Plodородie.* 5. pp. 38–42.
78. He, S.L., Wang, S.Q. & Wang, Q.Y. (2019) Allelochemicals as growth regulators: A review. *Allelopathy Journal.* 48. pp. 15–26.
79. Ali, Q., Shehzad, F., Waseem, M. & Perveen, R. (2020) Plant-based biostimulants and plant stress responses (Book Chapter). In: *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives*. Springer. pp. 625–661.
80. Kolesnikova, I.Ya. & Voronin, L.V. (2019) Influence of Biopesticides on Soil Micromycetes Complexes in Agroecosystem. *Ekosistemy.* 18. pp. 97–107. (In Russian)
81. Fenibo, E.O., Ijoma, G.N. & Matambo, T. (2021) Biopesticides in Sustainable Agriculture: A Critical Sustainable Development Driver Governed by Green Chemistry Principles. *Front. Sustain. Food Syst. Sec. Agroecology and Ecosystem Services.* 5. doi:10.3389/fsufs.2021.619058

Информация об авторах:

Памирский Игорь Эдуардович – кандидат биологических наук, директор Опытной станции «Элитная» Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (р.п. Краснообск, Россия); старший научный сотрудник Высшей инженерной школы агробиотехнологий, Томский государственный университет (Томск, Россия). E-mail: pamirskiye@sfscs.ru

Артеменко Александр Федорович – аспирант Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (р.п. Краснообск, Россия). E-mail: a.f.artemenko@mail.ru

Асатурова Анжела Михайловна – кандидат биологических наук, директор Федерального научного центра биологической защиты растений (Краснодар, Россия). E-mail: biocontrol-vniibzr@yandex.ru

Томашевич Наталья Сергеевна – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора Федерального научного центра биологической защиты растений (Краснодар, Россия). E-mail: nataliatomashevich@yandex.ru

Голохваст Кирилл Сергеевич – доктор биологических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАО, директор Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (р.п. Краснообск, Россия); старший научный сотрудник Высшей инженерной школы агробиотехнологий, Томский государственный университет (Томск, Россия). E-mail: droopy@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Pamirsky Igor E. – Cand.Sc. (Biology), director, “Elitnaya” Experimental Station, Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation); Senior researcher, Higher Engineering School of Agro-biotechnology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: pamirskiye@sfscs.ru

Artemenko Alexander F. – post-graduate student, Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation). E-mail: a.f.artemenko@mail.ru

Asaturova Angela M. – Cand.Sc. (Biology), director, Federal Research Center of Biological Plant Protection (Krasnodar, Russian Federation). E-mail: biocontrol-vniibzr@yandex.ru

Tomashevich Natalia S. – Cand. Sc. (Agriculture), deputy director, Federal Research Center of Biological Plant Protection (Krasnodar, Russian Federation). E-mail: nataliatomashevich@yandex.ru

Golokhvast Kirill S. – Dr. Sc. (Biology), professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Education, Director of the Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Russian Federation); Senior researcher, Higher Engineering School of Agrobiotechnology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: droopy@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025; принята к публикации 25.11.2025

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 21.11.2025; accepted for publication 25.11.2025

Технологии материаловедения

Научная статья
УДК 621.762, 538.9
doi: 10.17223/29491665/9/3

Исследование влияния механической активации на структуру и свойства керамики FeV₅₀-Cr-Ti-Hf-N

Николай Сергеевич Евсеев¹, Антон Павлович Хрусталёв², Иван Алексеевич Бельчиков³,
Марина Григорьевна Хмелева⁴, Илья Александрович Жуков⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ evseevns@gmail.com

² tofik0014@gmail.com

³ ivan70422@gmail.com

⁴ khmelevamg@gmail.com

⁵ gofra930@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние механической активации на процесс формирования композиционных частиц системы FeV₅₀-Cr-Ti-Hf прессованных образцов FeV₅₀-Cr-Ti-Hf при горении в азотной среде в условиях высокого давления. На основе полученных данных рентгеноструктурного анализа установлено, что продолжительность механической активации в течение 2 ч является оптимальной для получения композиционных частиц с соотношением компонентов, близким к стехиометрическому. При этом отклонения от стехиометрического соотношения для Hf и FeV составляют менее 5 мас. %, а для Ti и Cr – менее 2 мас. %, при сохранении неизменного фазового состава. Механические испытания горячепрессованных образцов, полученных в результате синтеза смеси с оптимальным временем механической активации, показали, что твердость таких образцов достигает 1858±50 HV с пределом прочности на изгиб 363±18 МПа.

Ключевые слова: керамика, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, структура, фазовый состав, твердость

Благодарности: результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2024-0007

Для цитирования: Евсеев Н.С., Хрусталёв А.П., Бельчиков И.А., Хмелева М.Г., Жуков И.А. Исследование влияния механической активации на структуру и свойства керамики FeV₅₀-Cr-Ti-Hf-N // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 28–35. doi: 10.17223/29491665/9/3

Original article
doi: 10.17223/29491665/9/3

Study of the influence of mechanical activation on the structure and properties of ceramics FeV₅₀-Cr-Ti-Hf-N

Nikolay S. Evseev¹, Anton P. Khrustalev², Ivan A. Belchikov³,
Marina G. Khmeleva⁴, Ilya A. Zhukov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ evseevns@gmail.com

² tofik0014@gmail.com

³ ivan70422@gmail.com

⁴ khmelevamg@gmail.com

⁵ gofra930@gmail.com

Abstract. The influence of mechanical activation on the formation process of composite particles of the FeV₅₀-Cr-Ti-Hf system of pressed FeV₅₀-Cr-Ti-Hf samples during combustion in a nitrogen environment under high pressure conditions was investigated. Based on the obtained X-ray diffraction analysis data, it was established that a mechanical activation duration of 2 hours is optimal for obtaining composite particles with a component ratio close to the stoichiometric one. Moreover, deviations from the stoichiometric ratio for Hf and FeV are less than 5 wt. %, and for Ti and Cr – less than 2 wt. %, while maintaining an unchanged phase

composition. Mechanical tests of hot-pressed samples obtained as a result of the synthesis of a mixture with an optimal mechanical activation time showed that the hardness of such samples reaches 1858 ± 50 HV with an ultimate flexural strength of 363 ± 18 MPa.

Keywords: ceramics, self-propagating high-temperature synthesis, structure, phase composition, hardness

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. № FSWM-2024-0007).

For citation: Evseev, N.S., Khrustalev, A.P., Belchikov, I.A., Khmeleva, M.G. & Zhukov, I.A. (2025) Study of the influence of mechanical activation on the structure and properties of ceramics FeV₅₀-Cr-Ti- Hf-N. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 28–35. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/3

Введение

Концепция синтеза многокомпонентных систем с равномерным или «околоэквилярным» процентным содержанием элементов (от 5% и выше) открыла новый класс материалов – высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) [1] и высокоэнтропийные керамики (ВЭК) [2]. Состав каждого элемента в таких системах варьируется от 5 до 35 атомных процентов. Исследования таких материалов показывают, что исключительные свойства высокоэнтропийных материалов достигаются за счет четырех «ключевых эффектов»: высокой энтропии, искажения кристаллической решетки, замедленной диффузии и эффекта «коктейля» [3]. Следует отметить, что свойства многокомпонентных систем определяются не только составом элементов, но и образованием фаз: в зависимости от состава, способов изготовления и обработки сплавы ВЭС могут содержать упорядоченные и неупорядоченные фазы твердого раствора. Ключевую роль в этом играют как атомы отдельных элементов, так и формирующиеся фазы, при этом все они вносят вклад в конечные свойства [4].

Многокомпонентные сплавы и керамики обладают многообещающими характеристиками, такими как высокая коррозионная стойкость, износостойкость, повышенная твердость и другие механические свойства [5]. Этот класс материалов активно исследуется, расширяя методы их получения. К числу методов относятся вакуумно-дуговая плавка [6], селективное лазерное сплавление [7], магнетронное распыление [8] и другие.

Несмотря на значительные исследования, остается актуальным поиск эффективных способов синтеза высокоэнтропийных материалов и композиций, содержащих высокоэнтропийные фазы с улучшенными физико-механическими свойствами. Одним из перспективных методов считается самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Его преимущества – высокая производительность, низкое энергопотребление, экологическая безопасность по сравнению с традиционными методами, а также возможность регулировки структуры и свойств конечных продуктов за счет выбора режима сгорания и давления. На сегодняшний день системы ВЭС и ВЭК (а

также многокомпонентные композиции) на основе тугоплавких металлов недостаточно изучены, однако интерес к таким сплавам возрастает и исследуется различными научными группами материаловедов [9].

Одним из широко распространенных методов повышения реакционной способности обрабатываемых веществ является их механическая активация (МА). Такой подход позволяет изменять физико-химические свойства материалов, что влияет на активность и стабильность формирования фаз, а также обеспечивает возможность получения материалов с заранее определенными характеристиками [10].

Целью работы является изучение влияния механической активации на структуру и свойства керамики на основе многокомпонентной системы FeV₅₀-Cr-Ti-Hf-N.

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов порошковой смеси использовали порошки хрома марки ПХМ (размером частиц менее 50 мкм), титана марки ПТС (размером менее 280 мкм), феррованадия марки FeV₅₀ (размер частиц ≤ 200 мкм) и металлического гафния (размер частиц ≤ 200 мкм). Чистота шихтовых порошков хрома, титана и гафния составляла более 99,0 мас.%. Для порошка феррованадия FeV₅₀ чистота составила порядка 98,0 мас.%.

Шихтовые компоненты смешивались согласно стехиометрического соотношения относительно соединения [HfTiCr(FeV)]N (рис. 1, а), затем проводилась механическая активация смеси при помощи планетарной мельницы (рис. 1, б) при частоте вращения 840 об/мин в атмосфере аргона. Продолжительность механической активации варьировалась от 0 до 3 ч. Соотношение массы стальных шаров диаметром 8 мм и порошковой смеси составило 4 к 1. Из полученной порошковой смеси методом холодного одноосного прессования при давлении 35 МПа формировались образцы диаметром 23 мм. Синтез образцов (рис. 1, в) осуществлялся в реакторе высокого давления объемом 15 л.

Производилось вакуумирование реактора, наполнение азотом (чистота 99,99%) и подача электрического тока на поджигающую спираль. Для осуществления равномерного прогрева прессованного образца

между верхней его поверхностью и поджигающей спиралью помещался вспомогательный воспламеняющийся слой. В качестве поджигающего слоя был ис-

пользован порошок титана. После остывания в закрытом реакторе до комнатной температуры образец извлекался из камеры.

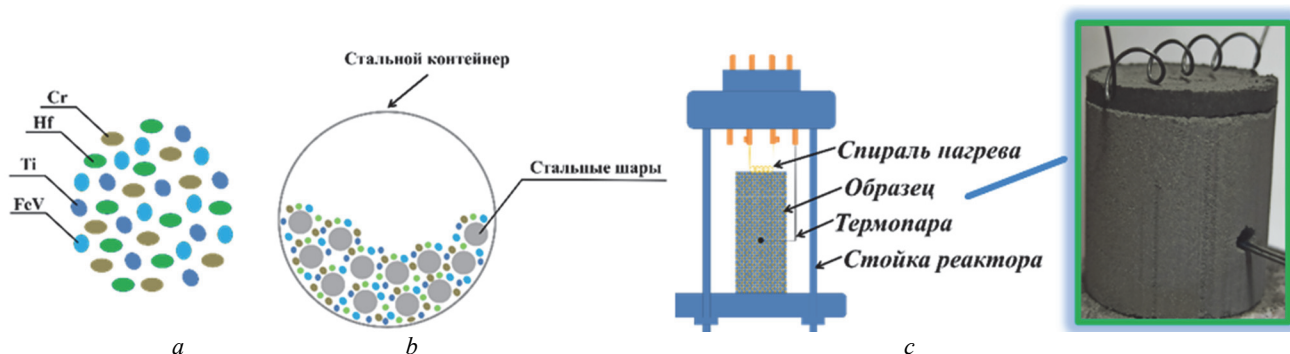


Рис. 1. Стадии получения керамических материалов из $\text{FeV}_{50}\text{-Cr-Ti-Hf-N}$

Fig. 1. Stages of obtaining ceramic materials from $\text{FeV}_{50}\text{-Cr-Ti-Hf-N}$

Температуру синтеза измеряли с помощью вольфрам-рейниевых термопар WR 5/20 диаметром 0,5 мм, подведенных в центр образца. Измерения выполняли с помощью многоканального измерителя («RealLab», Россия). Рентгенофазовый анализ полученных продуктов синтеза осуществляли на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 (Shimadzu Corporation, Япония) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения и базы данных PDF4+. Микроструктуру конечных продуктов исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа с катодом Шоттки Tescan MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding, Брно, Чехия), дополнительно оснащенного энергетико-дисперсионным рентгеновским спектрометром Oxford Instruments Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Хай-Уиком, Великобритания).

Твердость по Виккерсу рассчитывалась при помощи твердомера Металаб 703 (Россия) с нагрузкой на алмазный индентор 30 кг и 20-секундной выдержкой. Предел прочности на изгиб определялся на универсальной электромеханической испытательной машине INSTRON 3369 (Великобритания) методом трехточечного изгиба со скоростью движения траверсы 0,2 мм/мин.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены дифрактограммы, а в таблице – фазовый состав шихтовой смеси $\text{FeV}_{50}\text{-Cr-Ti-Hf}$ в зависимости от продолжительности механической активации (от ручного перемешивания 0 ч до 3 ч МА).

Анализ полученных дифрактограмм показал, что в исследуемой смеси на протяжении всей продолжительности механической активации в диапазоне 0–3 ч присутствуют фазы хрома, феррованадия, титана и гафния. Другие фазы не выявлены.

Согласно таблице наиболее близкое к заданному соотношению (стехиометрическому) массовое соотношение компонентов смеси достигается при продолжительности механической активации 2 ч, при этом отклонение от исходных пропорций составляет не более 4 мас. % для гафния и феррованадия, а для титана и хрома – менее 2 мас.%. На рис. 3 представлены РЭМ-изображения микроструктуры (рис. 2, а–с) с картированием по элементам исходной смеси $\text{Cr-FeV}_{50}\text{-Hf-Ti}$ при различной продолжительности механической активации.

Установлено, что в исходной смеси без МА (рис. 3, а) наблюдается неравномерное распределение металлических частиц Hf, Ti, Cr, FeV.

Проведение механической активации способствует формированию композиционных частиц (рис. 3, b, c), состоящих из крупных частиц гафния с мелкодисперсными включениями частиц других металлических компонентов рассматриваемой системы. Установлено, что интенсивный процесс формирования таких частиц начинается в диапазоне времени МА от 1 до 2 ч.

Дальнейшее увеличение времени механической активации приводит к агломерации таких частиц и образованию комков. При этом на стенках барабана планетарной мельницы и мелющих шарах наблюдается налипание порошка, что приводит к отклонению концентрации компонентов смеси от изначально заданного состава (что согласуется с рис. 2 и таблицей).

Процесс формирования таких частиц наглядно отражен на рис. 3, d. Так, при ручном смешении (рис. 3, d, фрагмент 1) видна четкая граница между частицами различных элементов, входящих в исходных состав шихты.

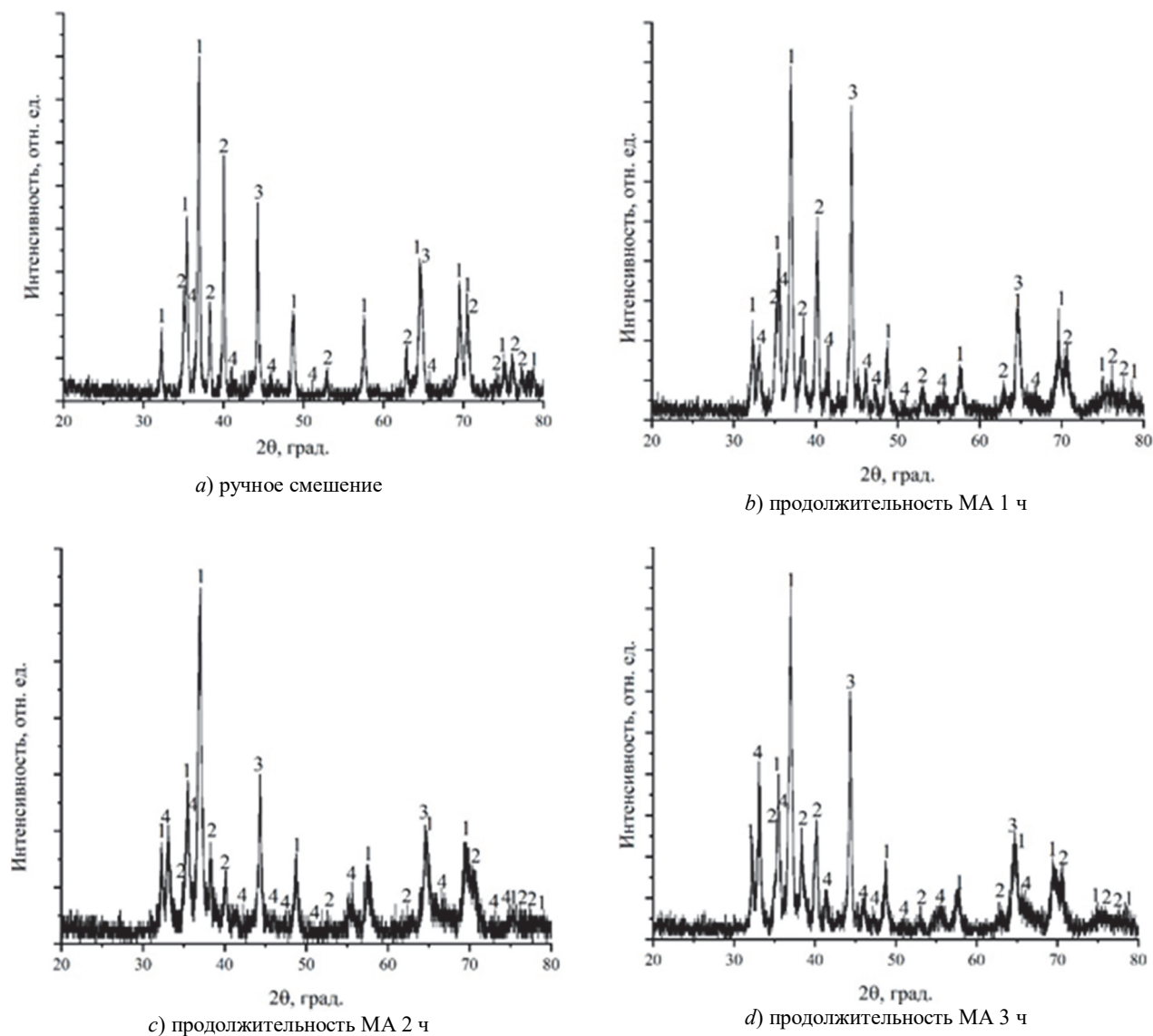


Рис. 2. Дифрактограммы порошковой шихты Cr-FeV₅₀-Hf-Ti в зависимости от продолжительности механической активации (фазы: 1 – Hf, 2 – Ti, 3 – Cr, 4 – FeV): a – без МА; b – 1 ч; c – 2 ч; d – 3 ч

Fig. 2. Diffraction patterns of the Cr-FeV₅₀-Hf-Ti powder mixture depending on the duration of mechanical activation (phases: 1 – Hf, 2 – Ti, 3 – Cr, 4 – FeV): a – without MA; b – 1 h; c – 2 h; d – 3 h

Фазовый состав шихтовой смеси FeV₅₀-Cr-Ti-Hf в зависимости от времени механической активации

Обнаруженные фазы	Продолжительность механической активации, ч				
	Без МА	0,5	1	2	3
Содержание фаз, мас. %					
FeV	7	10	24	20	23
Cr	24	25	22	17	20
Ti	44	31	23	13	22
Hf	25	36	31	50	35

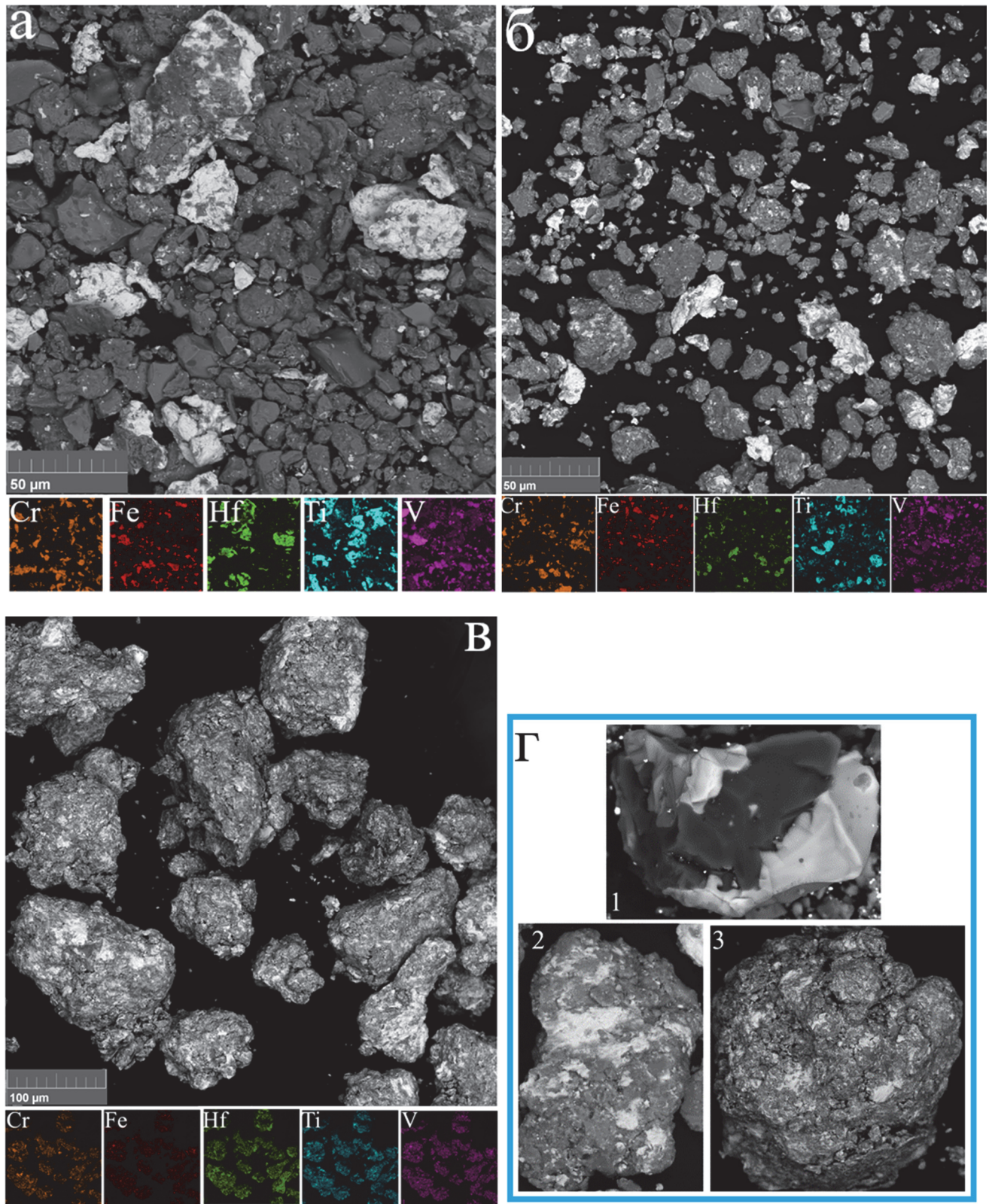


Рис. 3. РЭМ-изображения микроструктуры и картирование по элементам исходной смеси при продолжительности МА: *a* – 0 ч; *б* – 1 ч; *в* – 2 ч; *г* – 1 – без МА, 2 – 1 ч МА, 3 – 2 ч МА

Fig. 3. SEM – image of the microstructure and elemental mapping of the initial mixture depending on the MA duration: *a* – 0 h; *b* – 1 h; *c* – 2 h; *d* – 1 – no MA, 2 – 1 h MA, 3 – 2 h MA

Увеличение времени МА до 1–2 ч сглаживает эту границу между элементами и способствует более тесному контакту частиц (см. рис. 3, в, фрагменты 2 и 3).

Установлено, что образцы без механической активации многофазны и представлены главным образом фазами HfN, TiN, VN, HfCr₂, Ti, Ti_{0,475}V_{0,25}Cr_{0,25}Fe_{0,025}, Hf₃V₂N₅. Образцы, полученные при МА 60 мин, имели композиционную структуру. Энергодисперсионный анализ этих образцов показал, что элементы Ti, Hf, V, Fe, Cr, N распределены по поверхности и образуют матрицу, причем Cr является преобладающим элементом. При этом наблюдаются включения с высокой концентрацией элементов Ti, Hf, N и малым содержанием (3–6 ат. %) элементов V, Fe, Cr.

В случае 2-часовой механической активации на всех полученных рентгенограммах имеет место слабая интенсивность пиков при высоком фоне (что, вероятно, отражает формирование твердых растворов). При этом структура таких образцов наиболее равномерна.

Увеличение времени механической активации до 3 ч (рис. 4) приводило к агломерации частиц, налипанию их на стенках планетарной мельницы и мелющих шарах, что способствовало отклонению концентрации компонентов смеси от изначально заданного состава и появлению локальных областей, где присутствовали включения с преобладанием (Hf–Ti) N и малым содержанием (2–5 ат. %) элементов V, Fe, Cr.

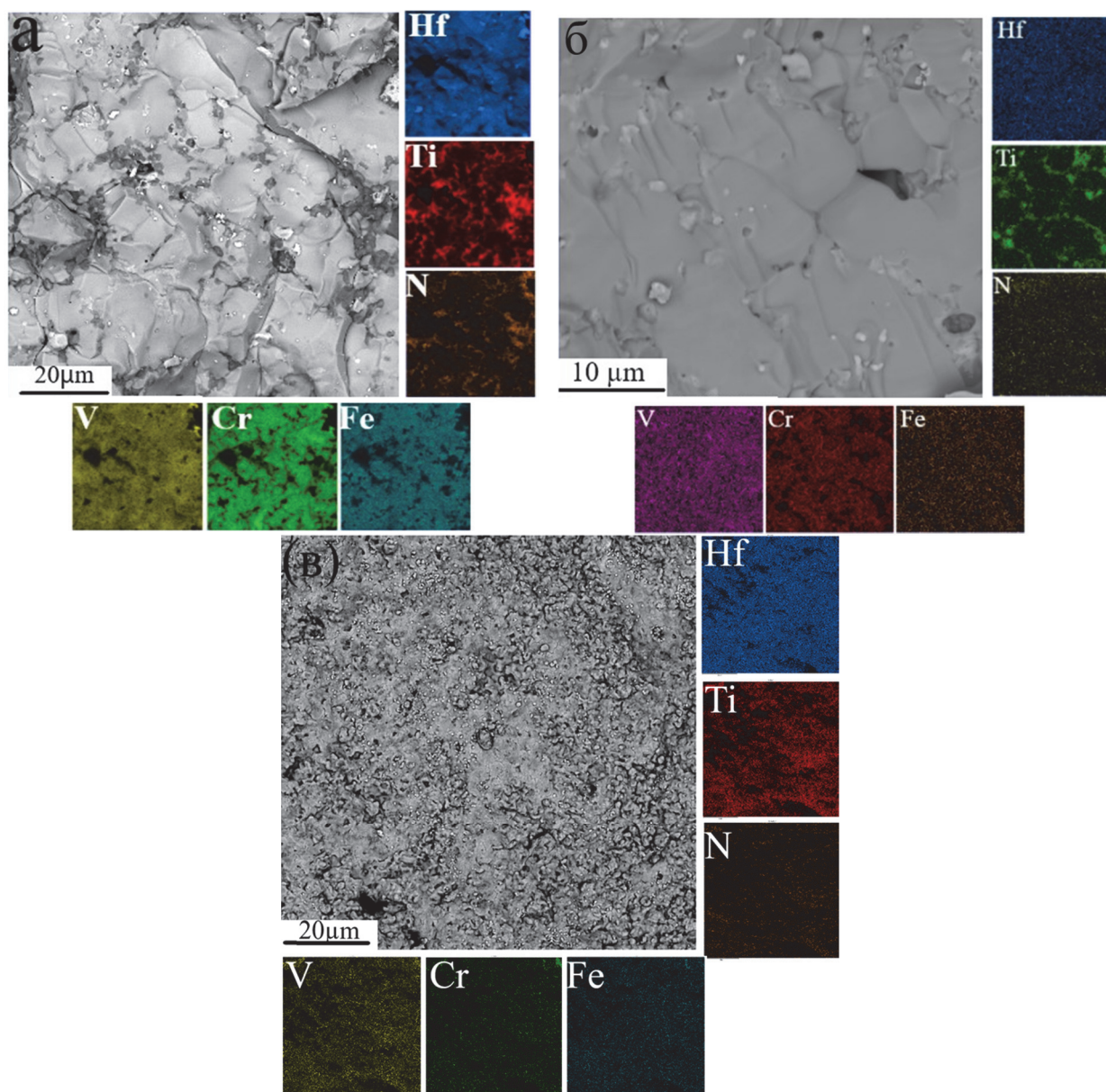


Рис. 4. РЭМ-изображения микроструктуры продуктов синтеза в зависимости от времени механической активации: а – 0 ч; б – 1 ч; в – 2 ч

Fig. 4. SEM images of the microstructure of the synthesis products depending on the time of mechanical activation: а – 0 h; б – 1 h; в – 2 h

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрировано существенное влияние механической активации на процесс формирования композиционных частиц системы Cr-FeV₅₀-Hf-Ti, а также структуру и фазовый состав продуктов синтеза. Оптимальным временем МА, при котором активно формируются композиционные частицы системы Cr-FeV₅₀-Hf-Ti с соотношением компонентов, максимально приближенным к стехиометрическому, является 2 ч.

В работе показана принципиальная возможность получения в режиме высокотемпературного синтеза с

предварительной механической активацией композиционной керамики с дисперсионными нитридными включениями, а также многокомпонентной керамики, состоящей из твердых растворов. Предварительные механические испытания горячепрессованных образцов, полученных в результате синтеза смеси с оптимальным временем механической активации, показали, что твердость таких образцов достигает 1858±50 HV с пределом прочности на изгиб 363±18 МПа. Для получения высокоплотных компактов требуется дальнейшее уплотнение материалов и проведение исследований влияния процесса измельчения продуктов синтеза на процесс их уплотнения.

Список источников

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // *Advanced engineering materials*. 2004. Vol. 6, № 5. P. 299–303. doi: 10.1002/adem.200300567
2. Xiang H., Xing Y., Dai F. et al. High-entropy ceramics: Present status, challenges, and a look forward // *Journal of Advanced Ceramics*. 2021. Vol. 10. P. 385–441. doi: 10.1007/s40145-021-0477-y
3. Cao B.X., Wang C., Yang T., Liu C.T. Cocktail effects in understanding the stability and properties of face-centered-cubic high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 187. P. 250–255. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.06.008
4. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D. et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345, № 6193. P. 1153–1158. doi: 10.1126/science.1254581
5. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Tikhonovsky M.A. Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy // *Materials Letters*. 2015. Vol. 142. P. 153–155. doi: 10.1016/j.matlet.2014.11.162
6. Peng H., Kang Z., Long Y., Zhou L. A two-phase ultrafine-grained NbMoTaWV refractory high entropy alloy with prominent compressive properties // *Vacuum*. 2022. Vol. 199. P. 110930. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.110930
7. Yuan B., Li C., Dong Y., Yang Y., Zhang P., Zhang Z. Selective laser melting of the Al_{0.3}CoCrFeNiCu high-entropy alloy: Processing parameters, microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. 2022. Vol. 220. P. 110847. doi: 10.1016/j.matdes.2022.110847
8. Zuo L., Gao Q., Xu Y.-C., Xie Z.-M., Zhang L.-C., Liu R. et al. Preparation, microstructure and properties of FeCrAlTiSi high entropy alloy coatings using the combined technique of magnetron sputtering with multiarc ion plating // *Vacuum*. 2025. Vol. 236. P. 114161. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114161
9. Senkov O.N., Isheim D., Seidman D.N., Pilchak A.L. Development of a Refractory High Entropy Superalloy // *Entropy*. 2016. Vol. 18, № 3. P. 102. doi: 10.3390/e18030102
10. Martin P., Aguilar C., Cabrera J.M. A review on mechanical alloying and spark plasma sintering of refractory high-entropy alloys: Challenges, microstructures, and mechanical behavior // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 1900–1928. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.205

References

1. Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Chin, T.S., Shun, T.T., & Chang, S.Y. (2004) Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*. 6 (5). p. 299–303. doi: 10.1002/adem.200300567
2. Xiang, H., Xing, Y., Dai, F., et al. (2021) High-entropy ceramics: Present status, challenges, and a look forward. *Journal of Advanced Ceramics*. 10. p. 385–441. doi: 10.1007/s40145-021-0477-y
3. Cao, B.X., Wang, C., Yang, T., & Liu, C.T. (2020) Cocktail effects in understanding the stability and properties of face-centered-cubic high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures. *Scripta Materialia*. 187. p. 250–255. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.06.008
4. Gludovatz, B., Hohenwarter, A., Catoor, D., et al. (2014) A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 345 (6193). p. 1153–1158. doi: 10.1126/science.1254581
5. Stepanov, N.D., Shaysultanov, D.G., Salishchev, G.A., & Tikhonovsky, M.A. (2015) Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy. *Materials Letters*. 142. p. 153–155. doi: 10.1016/j.matlet.2014.11.162
6. Peng, H., Kang, Z., Long, Y., & Zhou, L. (2022) A two-phase ultrafine-grained NbMoTaWV refractory high entropy alloy with prominent compressive properties. *Vacuum*. 199. p. 110930. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.110930
7. Yuan, B., Li, C., Dong, Y., Yang, Y., Zhang, P., & Zhang, Z. (2022) Selective laser melting of the Al_{0.3}CoCrFeNiCu high-entropy alloy: processing parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 220. p. 110847. doi: 10.1016/j.matdes.2022.110847
8. Zuo, L., Gao, Q., Xu, Y.-C., Xie, Z.-M., Zhang, L.-C., Liu, R., Pang, L.-L., Wang, Z.-G., Lu, G.-L., & Yang, J.-F. (2025) Preparation, microstructure and properties of FeCrAlTiSi high entropy alloy coatings using the combined technique of magnetron sputtering with multiarc ion plating. *Vacuum*. 236. p. 114161. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114161

9. Senkov, O.N., Isheim, D., Seidman, D.N., & Pilchak, A.L. (2016) Development of a Refractory High Entropy Superalloy. *Entropy*. 18 (3). p. 102. doi: 10.3390/e18030102
10. Martin, P., Aguilar, C., & Cabrera, J.M. (2024) A review on mechanical alloying and spark plasma sintering of refractory high-entropy alloys: Challenges, microstructures, and mechanical behavior. *Journal of Materials Research and Technology*. 30. p. 1900–1928. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.205

Информация об авторах:

Евсеев Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент Томского государственного университета (Томск, Россия), E-mail: evseevns@gmail.com

Хрусталеv Антон Павлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия), E-mail: tofik0014@gmail.com

Бельчиков Иван Алексеевич – младший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия), E-mail: ivan70422@gmail.com

Хмелева Марина Григорьевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия), E-mail: khmelevamg@gmail.com

Жуков Илья Александрович – доктор технических наук, профессор Томского государственного университета (Томск, Россия), E-mail: gofra930@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Evseev Nikolay S. – Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evseevns@gmail.com

Khrustalev Anton P. – Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: tofik0014@gmail.com

Belchikov Ivan A. – Junior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ivan70422@gmail.com

Khmeleva Marina G. – Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: khmelevamg@gmail.com

Zhukov Ilya A. – Dr.Sc. (Engineering), professor, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025

The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 04.12.2025

Научная статья

УДК 535.37, 628.9.037, 548.4, 544.778.4, 539.2, 620.3, 535.375.54

doi: 10.17223/29491665/9/4

Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов

Анна Анатольевна Чеботова¹, Захар Игоревич Бородулин², Илья Сергеевич Петров³,
Евгения Сергеевна Шеремет⁴, Иван Николаевич Лапин⁵, Евгений Игоревич Липатов⁶,
Александр Борисович Ворожцов⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия^{3, 4} Томский политехнический университет, Томск, Россия⁶ evlip@mail2000.ru

Аннотация. В данной работе были исследованы свойства поверхности образцов суспензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Образцы суспензии детонационных наноалмазов были подвергнуты очистке от неалмазной фазы углерода термическим отжигом при температуре 500 °С, что привело к исчезновению в спектрах комбинационного рассеяния полос sp^2 -гибридизованного углерода (графена) на 1362 и 1586 cm^{-1} , усилению полос sp^3 -гибридизованного углерода (наноалмаза) на 1320 cm^{-1} , появлению полос sp^3 -гибридизованного аморфного углерода на 1265 и 1552 cm^{-1} и полосы кислородосодержащих функциональных групп на 1065 cm^{-1} . Образцы суспензии детонационных наноалмазов были разделены на фракции методами седиментации и центрифугирования. Методом центрифугирования удалось выделить фракции детонационных наноалмазов с размерами до 20 и до 60 нм.

Ключевые слова: детонационные наноалмазы, центрифугирование, атомно-силовая микроскопия, комбинационное рассеяние, фотолуминесценция, аллотропы углерода

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030), проект № 2.4.4.23 ИГ « N_2V^0 -центры окраски алмаза для квантовой магнитометрии».

Для цитирования: Чеботова А.А., Бородулин З.И., Петров И.С., Шеремет Е.С., Лапин И.Н., Липатов Е.И., Ворожцов А.Б. Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 36–43. doi: 10.17223/29491665/9/4

Original article

doi: 10.17223/29491665/9/4

Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds

Anna A. Chebotova¹, Zakhar I. Borodulin², Ilya S. Petrov³, Evgeniya S. Sheremet⁴,
Ivan N. Lapin⁵, Evgeniy I. Lipatov⁶, Alexander B. Vorozhtsov⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation^{3, 4} Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation⁶ evlip@mail2000.ru

Abstract. In this work, the surface properties of samples of a detonation nanodiamond suspension produced by JSC Federal Research and Production Center “Altai”, Biysk, Russia, were investigated. The samples of the detonation nanodiamond suspension were purified from the non-diamond carbon phase by thermal annealing at 500 °C, which led to the disappearance of the bands of sp^2 -hybridized carbon (graphene) at 1362 and 1586 cm^{-1} , an increase in the band of sp^3 -hybridized carbon (nanodiamond) at 1320 cm^{-1} , and the appearance of bands of sp^3 -hybridized amorphous carbon at 1265 and 1552 cm^{-1} , as well as a band of oxygen-containing functional groups at 1065 cm^{-1} in the Raman spectra. The samples of the detonation nanodiamond suspension were fractionated by sedimentation and centrifugation. Using centrifugation, it was possible to isolate fractions of detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm and up to 60 nm. It should be noted that detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm have a high potential for use in biomedical technologies as carriers of functional groups and as photoluminescent nanoparticles. At the same time, it is necessary to be able to perform not only fractionation by nanoparticle size, but also fractionation by photoluminescence properties and by the content of specific diamond color centers (NV^- , N_2V^0 , etc.), including at the single-particle level. Based on such diamond nanoparticles, elements for photonic integrated circuits, contrast agents for magnetic resonance imaging, probes for atomic force microscopy, single-photon sources, and three-dimensional photonic crystals (diamond opals) are being developed.

Key words: detonation nanodiamonds, centrifugation, atomic force microscopy, Raman scattering, photoluminescence, carbon allotropes

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Tomsk State University Development Program (Priority 2030), project №2.4.4.23 IG «N₂V⁰ diamond color centers for quantum magnetometry».

For citation: Chebotova, A.A., Borodulin, Z.I., Petrov, I.S., Sheremet, E.S., Lapin, I.N., Lipatov, E.I. & Vorozhtsov, A.B. (2025) Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeystelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 36–43. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/4

Введение

Детонационные наноалмазы (ДНА) – это продукт взрывного разложения углеродосодержащих взрывчатых веществ в условиях недостатка кислорода. При подрыве смеси тротила и гексогена во взрывной камере в течение 10^{-7} – 10^{-6} с при давлении от 17 до 30 ГПа и температуре свыше 3 000 К происходит синтез ДНА [1]. Чтобы предотвратить окисление и графитизацию алмаза, необходимо охлаждать продукты взрыва. В качестве охлаждающей среды используются вода, инертный газ или продукты предыдущего подрыва. Из образовавшейся шихты механической и химической очистками выделяются наноразмерные углеродные наночастицы – ДНА [2, 3].

Работы по детонационному синтезу наноалмазов ведутся с начала 1960-х гг. в нескольких научных центрах России: РФЯЦ ВНИИТФ им. академика Е.И. Забахина (г. Снежинск), Филиал ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семёнова (г. Черноголовка), ИГиЛ СО РАН им. М.А. Лаврентьева (г. Новосибирск), АО ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск) и др. [4, 5].

ДНА отличаются от природных импактных наноалмазов и наноалмазов, синтезированных при высоких статических давлениях и температурах, своим сложным строением и физико-химическими свойствами. Углеродная часть ДНА представлена алмазным ядром (алмазным кристаллитом), окруженным нарушенной углеродной оболочкой, содержащей наночастицы графита, скрученный слой графена и другие углеродные аллотропы. На поверхности нарушенной углеродной оболочки на нескомпенсированных валентных атомах углерода хемосорбируются функциональные группы, включая различные соли, карбиды, оксиды металлов [6].

Ввиду наноразмеров ДНА в углеродном ядре может существовать единственный люминесцирующий центр окраски. По этой причине центры окраски в ДНА рассматриваются как кандидаты в кубиты для квантовых вычислений и в высокоскоростные источники одиночных фотонов, не подверженных фотодеградации и эффектам мерцания [6, 7].

Центры окраски NV[−] и N₂V⁰ в ДНА обладают двумя локализованными электронами, расщеплением электронных уровней на спиновые подуровни, синглетными и триплетными системами и, как следствие, интеркомбинационной конверсией. Воздействие ВЧ, СВЧ, электрического или магнитного по-

лей могут изменять интенсивность фотолюминесценции данных центров. Способность NV[−] и N₂V⁰ центров проявлять высокую чувствительность фотолюминесценции используется для создания сверхточных сенсоров магнитного и электрического полей, температуры и других физических величин [8].

Однако не каждая наночастица ДНА проявляет фотолюминесценцию, что объясняется как химическим составом оболочки, так и дефектностью алмазного ядра. В данной работе мы провели предварительные исследования ДНА производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, на предмет влияния размера наночастиц на их оптические свойства.

Материалы и методы исследований

Эксперимент № 1. Известно свойство водной суспензии ДНА с течением времени коагулировать, т.е. формировать агрегаты и коагуляционные структуры. Необработанная водная суспензия ДНА была помещена в ультразвуковую ванну для равномерного распределения частиц по объему и частичной дефрагментации агрегатов. После ультразвуковой обработки в течение 30 мин из суспензии ДНА было отобрано 5 мл раствора. Отобранный объем был смешан с 1 л дистиллированной ионизированной воды в колбе.

Далее методом седиментации было произведено разделение разбавленной суспензии на 5 фракций – от самой крупной (фракция 1) до самой мелкой (фракция 5). Для этого разбавленная суспензия отстаивалась в течение 15 мин в отсутствие перемешивания и заметных вибраций. Предполагается, что в течение этого времени самые крупные ДНА и их агрегаты под действием гравитации опускались на дно колбы быстрее, чем ДНА меньшего размера. По истечении 15 мин производился отбор 5 мл суспензии со дна колбы, которые смешивались с 1 л дистиллированной воды. Затем процедура повторялась; таким образом были получены 5 фракций водяной суспензии ДНА (рис. 1).

Полученные фракции были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в закрытом помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата. Полученные конгломераты были исследованы на конфокальном флуоресцентном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO (Carl Zeiss Group, Германия).

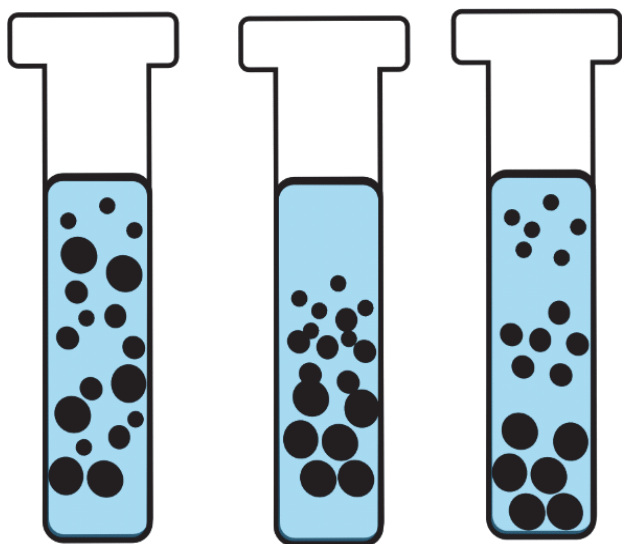


Рис. 1. Процесс седиментации – разделение водной суспензии по размеру наночастиц ДНА под действием гравитации

Fig. 1. The sedimentation process – the separation of a water suspension by the size of detonation nanodiamonds under the action of gravity

Эксперимент № 2. Четыре образца суспензии ДНА массой по 2 г каждый были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата.

Образцы 1 и 2 использовались как контрольные и не подвергались очистке. Образцы 3 и 4 были подвергнуты очистке нагревом до 500 °С в воздушной среде в течение 4 ч в муфельной печи SX-2-12D (Shanghai Shiyen Electric Furnace Co., Ltd., Китай). Полученные сухие конгломераты были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния при возбуждении непрерывным лазерным излучением на 457 нм (см. рис. 5–7).

Затем все образцы были растворены в смеси этилового спирта-ректификата массой 200 г и поливинилпиралидона массой 3×10^{-3} г, и в виде капель суспензии помещены на оптическое стекло (рис. 2).

Далее образцы были помещены в центрифугу LC-8C (JoanLab, Китай), где в течение 30 мин при 3 000 об./мин производилось разделение суспензии на фракции (рис. 3). В центрифуге под действием центробежной силы суспензия, содержащая наночастицы ДНА и их агрегаты различной формы, разделилась на фракции. С разной глубины пробирки собирались фракции образца с различными размерами наночастиц.

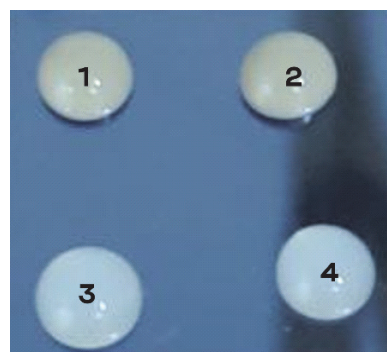


Рис. 2. Фотография образцов ДНА, растворенных в смеси этилового спирта и поливинилпиралидона в пропорции 666667:1, на оптическом стекле: 1 – образец, не подвергнутый термической очистке, 2 – контрольный образец, не подвергнутый термической очистке, 3 – образец, подвергнутый термической очистке, 4 – контрольный образец, подвергнутый термической очистке

Fig. 2. Photo of samples of detonation nanodiamonds dissolved in a mixture of ethyl alcohol and polyvinylpyrrolidone in a ratio of 666667:1 on optical glass. 1 is a sample that has not been thermally cleaned, 2 is a control sample that has not been thermally cleaned, 3 is a sample that has been thermally cleaned, 4 is a control sample that has been thermally cleaned

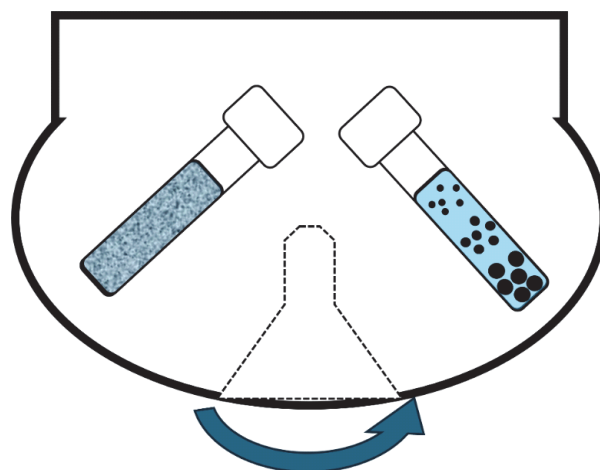


Рис. 3. Схема центрифугирования суспензии ДНА в смеси этилового спирта и поливинилпиралидона

Fig. 3. Scheme of centrifugation of bottom suspension in a mixture of ethyl alcohol and polyvinylpyrrolidone

После центрифугирования были отобраны 2 образца – с наибольшими и наименьшими фракциями ДНА. Образцы были помещены на высокоориентированный лабораторно-произведенный графит и исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Ntegra (NT-MDT, Россия). АСМ исследование поверхности образцов позволило оценить максимальный размер ДНА в каждой из двух фракций.

Результаты

Эксперимент № 1. На конфокальном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO были получены спектры фотолюминесценции сухих фракций ДНА 1 и 5 (рис. 4, *a* и *b*, соответственно). На вставках приведены фотографии исследуемых образцов и крестами отмечены точки измерения спектров фотолюминесценции. Очевидно, что принципиальных отличий в образцах не

наблюдается как на фотографиях, так и в спектрах фотолюминесценции. Полученные спектры фотолюминесценции содержат различные полосы, которые затруднительно идентифицировать при данном спектральном разрешении. В любом случае остаётся непонятным, является наблюдавшаяся фотолюминесценция свечением алмазного ядра либо данное свечение есть проявление нарушенной углеродной оболочки или хемосорбированных функциональных групп.

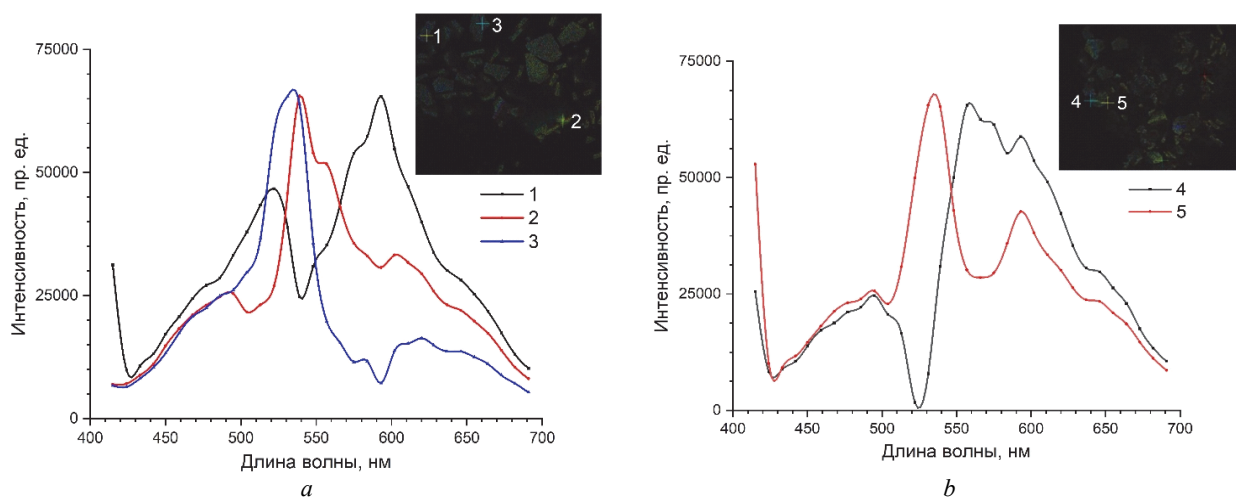


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции 1-й фракции (*a*) и 5-й фракции (*b*) ДНА под воздействием лазерного излучения 405 нм. На вставках приведены фотографии с отмеченными участками, в которых измерены спектры фотолюминесценции

Fig. 4. Photoluminescence spectra of fraction 1 (*a*) and fraction 5 (*b*) of detonation nanodiamonds under the action of 405 nm laser radiation. The inserts show photographs with marked areas in which photoluminescence spectra are measured

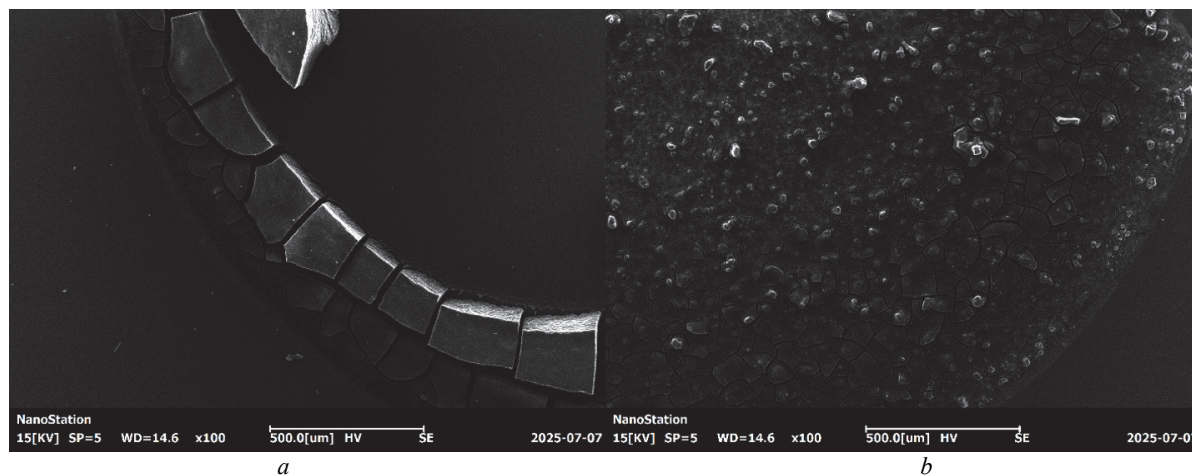


Рис. 5. СЭМ изображения образцов ДНА: *a* – до очистки (образец 1) и *b* – после очистки (образец 3)

Fig. 5. SEM images of samples of detonation nanodiamonds *a*) before cleaning (sample 1) and *b*) after cleaning (sample 3)

Эксперимент № 2. На рис. 5 приведены СЭМ изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе Сохет EM-30+ (Сохет, Южная Корея), образцов ДНА до и после очистки, т.е. образца 1 (рис. 4, *a*) и образца 3, при увеличении 100х и ускоряющем напряжении 10 кВ (рис. 4, *b*).

Как следует из рис. 5, отжиг образцов суспензии ДНА привёл к дроблению агрегатов и коагуляционных структур.

На рис. 6 приведены спектры комбинационного рассеяния образцов ДНА до очистки и после очистки (образцы 1 и 3, соответственно), полученные на КР-спектрометре Ntegra (NT-MDT SI, Россия). Очистка

образцов отжигом привела к многократному усилению уровня сигнала в спектре комбинационного рассеяния, что говорит об усилении вклада фотолюминесценции в КР-сигнал. При этом наблюдалось усиление собственно полос комбинационного рассеяния.

Вычитание фона фотолюминесценции (рис. 7) позволило провести первичный анализ наблюдавшихся полос комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки. Положение и ширина на полувысоте полос комбинационного рассеяния (см. рис. 7) приведены в таблице.

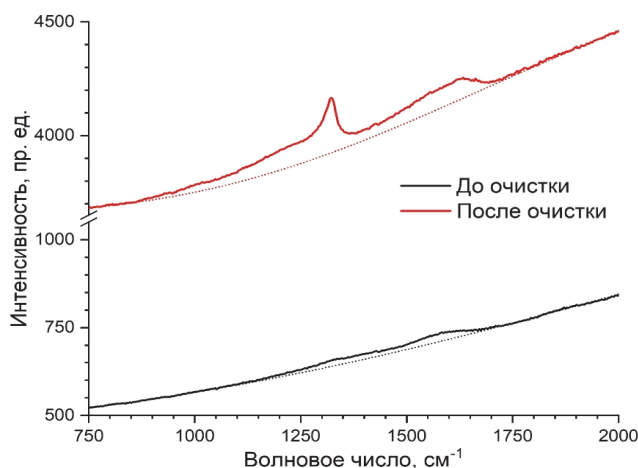


Рис. 6. Спектры комбинационного рассеяния ДНА до и после очистки (образец 1, нижний спектр, и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм

Fig. 6. Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and after purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm

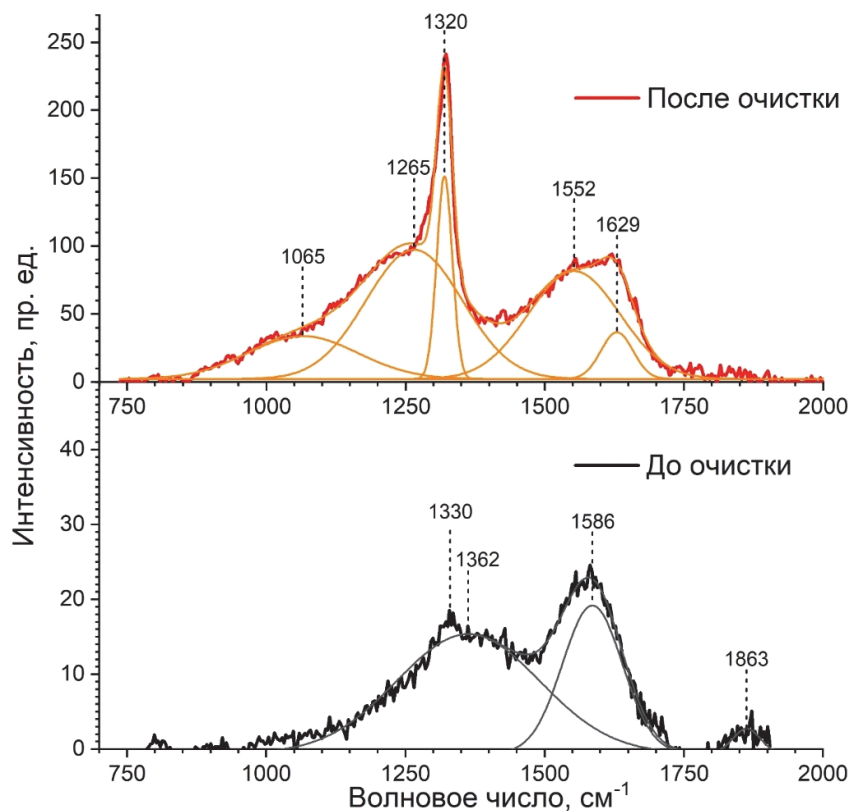


Рис. 7. Спектры комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки (образец 1, нижний спектр, и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм после вычитания фона фотолюминесценции

Fig. 7. Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and after purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm after subtracting the photoluminescence background

Положение в спектре и ширина на полувысоте полос комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки (образцы 1 и 3 соответственно)

Номер полосы	До очистки (образец 1)		После очистки (образец 3)	
	КР-сдвиг, см^{-1}	Ширина на полувысоте, см^{-1}	КР-сдвиг, см^{-1}	Ширина на полувысоте, см^{-1}
1	1 330	33,3	1 065	199,1
2	1 362	257,6	1 265	173,8
3	1 586	107,6	1 320	28,1
4	1 863	49,0	1 552	163,9
5	—	—	1 629	57,7

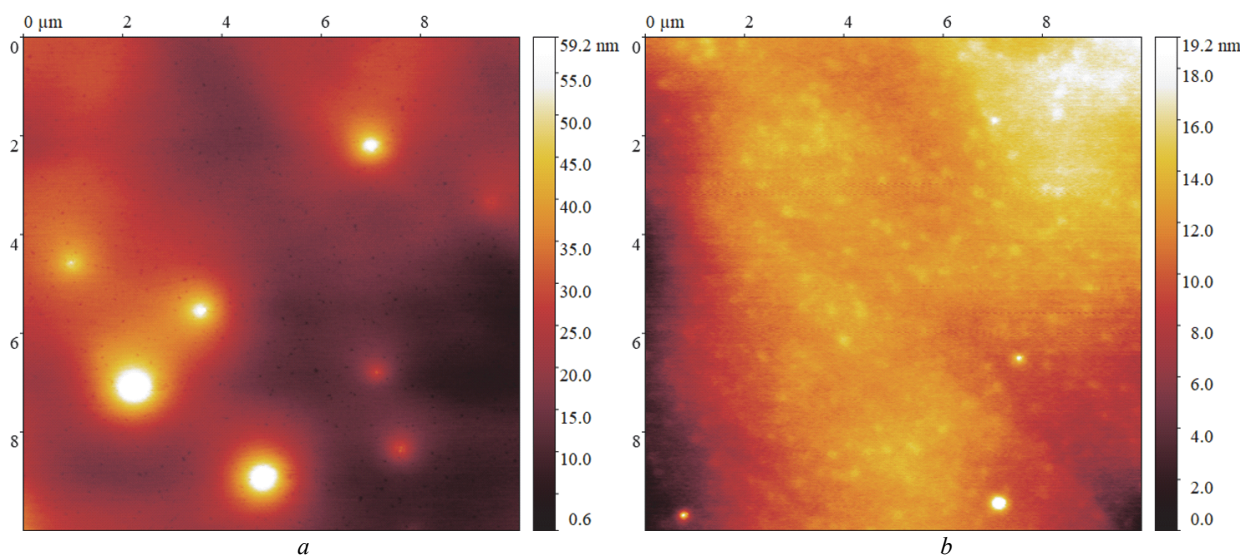


Рис. 8. АСМ-изображения образца ДНА после очистки отжигом (образец 3) и центрифугирования на 6 фракций: а – фракция 1 с наибольшим размером ДНА; б – фракция 6 с наименьшим размером ДНА

Fig. 8. AFM images of sample of detonation nanodiamonds after annealing purification (sample 3) and centrifugation into 6 fractions: a) the fraction 1 with the largest size of detonation nanodiamonds; b) the fraction 6 with the smallest size of detonation nanodiamonds

Анализ положений и полуширин полос комбинационного рассеяния позволяет предположить, что до очистки поверхность ДНА покрыта sp^2 -гибридизированным углеродом, ввиду этого полоса алмазного ядра на $1\,330\text{ см}^{-1}$ ослаблена и уширена. В КР-спектре доминируют D- и G-полосы графита на $1\,362$ и $1\,586\text{ см}^{-1}$, соответственно. Возможно, низкоинтенсивная полоса с максимумом $1\,863\text{ см}^{-1}$ связана с аморфными углеродными слоями [9–10].

Очистка отжигом приводит к сужению на полувысоте и смещению полосы sp^3 -гибридизированного углерода (нанодIAMЗОВ) в область меньших волновых чисел – на $1\,320\text{ см}^{-1}$. По-видимому, окисление поверхности ДНА привело к удалению графита, поэтому в КР-спектрах начала доминировать алмазная полоса с характерным смещением в область меньших волновых чисел, что наблюдалось и ранее для нанодIAMЗОВ [11], а также проявились полосы sp^3 -гибридизированного аморфного углерода на $1\,265$ и $1\,552\text{ см}^{-1}$, в то время как D- и G-полосы графита в КР-спектре не наблюдались. Окисление поверхности ДНА привело

к появлению в КР-спектре полосы $1\,065\text{ см}^{-1}$, отсутствующий до очистки. Данную полосу связывают с кислородосодержащими группами [11–13].

На рис. 8 приведены АСМ изображения, полученные после центрифугирования образца 3 и разделения его на фракции от 1 до 6 (1-я фракция – наибольший размер ДНА, 6-я фракция – наименьший размер ДНА). АСМ изображения получены с помощью атомного силового микроскопа Ntegra при размещении и сушке капель фракций 1 и 6 образца 3 на поверхности высокоориентированного графита созданного в Школе химических и биомедицинских технологий TERS-team.

Атомная силовая микроскопия позволила оценить максимальный размер ДНА во фракциях с наибольшим и наименьшим размером наночастиц в образце 3. Для фракции 1 с наибольшим размером наночастиц максимальный размер ДНА составил до 60 нм, в то время как для фракции 6 с наименьшим размером наночастиц максимальный размер ДНА составил до 20 нм.

В дальнейшем мы предполагаем провести исследование статистического распределения размеров отожжённых наночастиц, разделяемых на фракции с помощью центрифугирования, и установить связь среднего размера ДНА с составом их поверхности и спектрами их фотолюминесценции.

Заключение

В данной работе были исследованы образцы суспензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, разделенные на фракции методами седиментации и центрифугирования, в том числе очищенные от неалмазной фазы методом термического отжига. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии наблюдалось дефрагментация и дробление агрегатов ДНА и коагуляционных структур после термической обработки при 500 °С. С помощью метода атомно-силовой микроскопии наблюдалось разделение центрифугированием отожженного образца ДНА на фракции с размерами наночастиц до 20 и до 60 нм. С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния наблюдалось удаление и окисление

нарушенной углеродной оболочки ДНА в процессе отжига. При этом КР полосы sp^2 -гибридизированного углерода (1 362 и 1 586 cm^{-1}) исчезали из спектра, но усиливалась и смещалась в сторону меньших волновых чисел полоса sp^3 -гибридизированного алмазного ядра (с 1 330 до 1 320 cm^{-1}), а также проявлялись полосы sp^3 -гибридизированного аморфного углерода (1 265 и 1 552 cm^{-1}) и полоса кислородосодержащих функциональных групп (1 065 cm^{-1}).

Отметим, что ДНА с размерами до 20 нм имеют высокий потенциал для применения в биомедицинских технологиях как средства доставки функциональных групп и фотолюминесцирующих объектов. В то же время необходимо иметь возможность производить разделение на фракции ДНА не только по размеру наночастиц, но и по способности фотолюминесцировать, а также по содержанию конкретных центров окраски алмаза (NV^- , N_2V^0 и др.), в том числе в единичном количестве. На основе подобных алмазных наночастиц разрабатываются элементы для фотонных интегральных схем, контрасты для магнитно-резонансной томографии, зонды для атомно-силовой микроскопии, однофотонные источники и трехмерные фотонные кристаллы (алмазные опалы).

Список источников

1. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В., Яковлев Р.Ю. Химическое модифицирование поверхности детонационного наноалмаза. М. : Техносфера, 2020.
2. Decarby P.S., Jamison T.S. Detonation nanodiamonds // *Science*. 1961. Vol. 133 (3466). P. 1821–1823.
3. Ставер А.М., Лямкин А.И. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывчатых веществ // Ультрадисперсные алмазы: получение и свойства. Красноярск, 1990. 188 с.
4. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. СПб. : Профессионал, 2011. 536 с.
5. Даниленко В.В. Из истории открытия синтеза наноалмазов // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 4. С. 581–584.
6. Кулакова И.И. Химия поверхности наноалмаза // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 4. С. 621–628.
7. Хмельницкий Р.А., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : ИКАР, 2017.
8. Чащин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2024. № 8. С. 22–27. doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux M., Chang L.-Y. Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond // *Diamond and Related Materials*. Vol. 87. P. 248–260.
10. Штехлин С., Мерму М. Влияние размера на химию поверхности и спектры комбинационного рассеяния наноалмазов размером менее 5 нм, окисленных под высоким давлением, при высокой температуре и детонации // *Журнал физической химии*. 2020. С. 125.
11. Korepanov V.I., Hiro-o Hamaguchi, Eiji Osawa, Ermolenkov V., Lednev I.K., Etzold B.J.M., Levinson O., Zousman B. и др. Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy // *Carbon*. 2017. Vol. 121. P. 322–329.
12. Knapinska A.M., Tokmina-Roszyk D., Amar S., Tokmina-Roszyk M., Mochalin V.N., Gogotsi Yu., Cosme P., Terentis A.C., Fields G.B. // *Biopolymers*. 2015. Vol. 104(3). P. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

References

1. Kulakova, I.I., Lisichkin, G.V. & Yakovlev, R.Y. (2020) *Himicheskoe modifitsirovanie poverhnosti nanoalmazov* [Chemical modification of the detonation nanodiamond surface]. M: Tehnosfera (in Russian)
2. Decarby, P.S. & Jamison, T.S. (1961) Detonation nanodiamonds *Science*. 133 (3466). p. 1821–1823.
3. Staver, A.M. & Lyamkin, A.I. (1990) *Poluchenie ultradispersnykhalmazov iz vzrivchatykh veshstv* [Production of ultrafine diamonds from explosives]. Ultrafine diamonds: production and properties KR: p. 188 (in Russian)
4. Dolmatov, V.Y. (2011) *Detomatsionnye nanoalmazy. Polyuchenie, svoystva, primeneniye* [Detonation nanodiamonds. Getting, properties, and application]. SPB: NPO PROFESIONAL p. 536 (in Russian)
5. Danilenko, V.V. (2004) *Is istorii otkritiya sintesa nanoalmazov* [From the history of the discovery of nanodiamond synthesis]. Fisica tverdogo tela. pp. 581–584 (in Russian)
6. Kulakova, I.I. (2004) *Himiya poverhnosti nanoalmazov* [Chemistry of the nanodiamond surface]. Fisica tverdogo tela. pp. 621–628. (in Russian)

7. Khmel'nitskiy, R.A., Talipov, N.H. & Chucheva, G.V. (2017) *Sinteticheskiy almaz dlya elektroniki i optiki* [Synthetic diamond for electronics and optics] M: IKAR (in Russian)
8. Chashchin, V.V., Lyga, O.I. & Shulepov, M.A. (2024) Magnetosensitivity of N2V0-photoluminescence centers in diamond at different temperatures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeятel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 2227. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux, M. & Chang L.-Y. (2020) Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond. *Diamond and Related Materials*. 87. pp. 248–260.
10. Shtechlin, S. & Mermu, M. (2020) Effect of size on surface chemistry and RAMAN spectra of nanodiamonds smaller than 5 nm oxidized under high pressure, at high temperature and detonation *Jurnal fizicheskoy himii*. p. 125.
11. Korepanov, V.I. Hiro-o, Hamaguchi, Eiji, Osawa, Ermolenkov, V., Lednev, I.K., Etzold, B.J.M., Levinson, O., Zousman, B. et al. (2017) Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy. *Carbon*. 121. pp. 322–329.
12. Knapinska, A.M., Tokmina-Roszyk, D., Amar, S., Tokmina-Roszyk, M., Mochalin, V.N., Gogotsi, Yu., Cosme, P., Terentis, A.C. & Fields, G.B. (2015) *Biopolymers*. 104 (3). pp. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev, A.M. (2001) *Optical Properties of Diamond, Data Handbook*. B: Springer Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

Информация об авторах:

Чеботова Анна Анатольевна – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия)

Бородулин Захар Игоревич – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Петров Илья Сергеевич – инженер-исследователь исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5485-9132, 1248594

Шеремет Евгения Сергеевна – доктор философии, профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4712-8877, 551328

Лапин Иван Николаевич – заведующий испытательной лабораторией технических систем и средств досмотра Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 9760-7400, 136651

Липатов Евгений Игоревич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых информационных технологий, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-код: 8550-5968

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, директор центра управления научно-технологическими и инновационными проектами Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4764-7869, 44794

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Anna A. Chebotova, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation)

Zakhar I. Borodulin, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Ilya S. Petrov, research engineer at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5485-9132, 1248594

Evgeniya S. Sheremet, Philosophy Doctor, Professor at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4712-8877, 551328

Ivan N. Lapin, Head of the Testing Laboratory of Technical Systems and Inspection Facilities, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 9760-7400, 136651

Evgeny I. Lipatov, Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory of quantum information technologies, associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evlip@mail2000.ru, ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-code: 8550-5968

Alexander B. Vorozhtsov, Doctor.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Center for Management of Scientific, Technological and Innovative Projects, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4764-7869, 44794

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025

The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 04.12.2025

Технологии противодействия техногенным угрозам

Научная статья
УДК 623.746.-519
doi: 10.17223/29491665/9/5

Научный задел и потенциал Томского государственного университета для развития новой отрасли беспилотных авиационных систем

Дмитрий Вадимович Шашев¹, Юлия Николаевна Рыжих², Александр Анатольевич Ерофеев³,
Станислав Викторович Шидловский⁴, Наталья Владимировна Нестерова⁵,
Кирилл Владимирович Костюшин⁶, Адиль Аскеров⁷, Анастасия Владимировна Червакова⁸,
Владимир Афанасьевич Архипов⁹, Сергей Александрович Басалаев¹⁰,
Антон Михайлович Булавко¹¹, Ксения Григорьевна Перфильева¹², Сергей Михайлович Федоров¹³,
Александр Витальевич Юстус¹⁴, Куат Исмаилов¹⁵, Сергей Эдуардович Шипилов¹⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16} Томский государственный университет, Томск, Россия

^{7, 8} ООО «Облачный вычислительный центр», Томск, Россия

¹¹ ГУ МЧС России по Томской области, Томск, Россия

¹ dshashev@mail.ru

² jula@ftf.tsu.ru

³ erofeew@yandex.ru

⁴ shidlovskiysv@mail.ru

⁵ nesterovanv@mail.tsu.ru

⁶ kostushink@hotmail.com

⁷ askerov121099@gmail.com

⁸ ch-nastya1997@mail.ru

⁹ leva@niipmm.tsu.ru

¹⁰ tarm@niipmm.tsu.ru

¹² k.g.perfiljeva@yandex.ru

¹⁴ yustus2130990@mail.ru

¹⁵ mendikjan@gmail.com

¹⁶ shipilov@mail.tsu.ru

Аннотация. Данная статья носит научно-популярный и информационный характер, освещая текущие разработки и задел Томского государственного университета в области беспилотных авиационных систем (БАС). В статье представлены актуальные научные направления и тренды технологий БАС, описаны результаты работ научных коллективов, а также продемонстрирована значимость системного подхода и связи научных направлений с подготовкой высококвалифицированных кадров.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, БАС, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, проектирование, система технического зрения, аэродинамика, дистанционное зондирование, автоматизированное проектирование, подготовка специалистов

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030), а также за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.

Для цитирования: Шашев Д.В., Рыжих Ю.Н., Ерофеев А.А., Шидловский С.В., Нестерова Н.В., Костюшин К.В., Аскеров А., Червакова А.В., Архипов В.А., Басалаев С.А., Булавко А.М., Перфильева К.Г., Федоров С.М., Юстус А.В., Исмаилов К., Шипилов С.Э. Научный задел и потенциал Томского государственного университета для развития новой отрасли беспилотных авиационных систем // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 44–60. doi: 10.17223/29491665/9/5

Original article

doi: 10.17223/29491665/9/5

The scientific reserve and potential of Tomsk State University for the development of a new industry of unmanned aircraft systems

Dmitriy V. Shashev¹, Yulia N. Ryzhikh², Alexander A. Yerofeyev³, Stanislav V. Shidlovskiy⁴, Natalia V. Nesterova⁵, Kirill V. Kostyushin⁶, Adil Askerov⁷, Anastasia V. Chervakova⁸, Vladimir A. Arkhipov⁹, Sergey A. Basalaev¹⁰, Anton M. Bulavko¹¹, Ksenia G. Perfilieva¹², Sergey M. Fedorov¹³, Alexander V. Justus¹⁴, Kuat Ismailov¹⁵, Sergey E. Shipilov¹⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{7, 8} Cloud Computing Center LLC, Tomsk, Russian Federation

¹¹ Ministry of Emergency Situations of Russia for the Tomsk region, Tomsk, Russian Federation

¹ dshashev@mail.ru

² jula@ftf.tsu.ru

³ erofeew@yandex.ru

⁴ shidlovskiysv@mail.ru

⁵ nesterovanv@mail.tsu.ru

⁶ kostushink@hotmail.com

⁷ askerov121099@gmail.com

⁸ ch-nastya1997@mail.ru

⁹ leva@niipmm.tsu.ru

¹⁰ tarm@niipmm.tsu.ru

¹² k.g.perfilieva@yandex.ru

¹⁴ yustus2130990@mail.ru

¹⁵ mendikjan@gmail.com

¹⁶ shipilov@mail.tsu.ru

Abstract. This article is a popular-science and informational piece that highlights the current developments and research efforts of Tomsk State University in the field of unmanned aircraft systems (UAS). It presents current scientific directions and technological trends in UAS, describes the results achieved by research teams, and demonstrates the importance of a systematic approach as well as the integration of scientific research with the training of highly qualified specialists.

Keywords: unmanned aircraft systems, UAS, unmanned aerial vehicles, UAVs, engineering, vision system, aerodynamics, remote sensing, computer-aided design, specialist training

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030), and the Russian Science Foundation № 22-19-00307-II, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00307/>.

For citation: Shashev, D.V., Ryzhikh, Yu.N., Yerofeyev, A.A., Shidlovskiy, S.V., Nesterova, N.V., Kostyushin, K.V., Askerov, A., Chervakova, A.V., Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Bulavko, A.M., Perfilieva, K.G., Fedorov, S.M., Justus, A.V., Ismailov, K. & Shipilov, S.E. (2025) The scientific reserve and potential of Tomsk State University for the development of a new industry of unmanned aircraft systems. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeystelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 44–60. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/5

Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р утверждена Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г., в соответствии с которой в течение ближайших 6,5 лет в стране должна появиться новая отрасль экономики, связанная с созданием и использованием гражданских беспилотников. Действие Стратегии распространяется на области разработки, производства и безопасной эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС), услуги, предоставляемые с применением БАС, развитие сквозных технологий и сервисов, развитие системы обучения и подготовки кадров, развитие безопасной инфраструктуры и создание научно-технического задела, необходимого для формирования и развития отрасли беспилотной авиации.

В соответствии с положениями Стратегии в настоящее время в России идет процесс формирования системы подготовки специалистов в сфере БАС, формируется единое научно-образовательное пространство для подготовки специалистов в сфере БАС, вузы имеют право разрабатывать гибкие образовательные программы в соответствии с запросами рынка труда и готовить специалистов, обладающих достаточными компетенциями для работы в данной сфере.

Министерством промышленности и торговли РФ реализуется федеральный проект «Разработка, стандартизация и серийное производство беспилотных авиационных систем и их комплектующих». В рамках этого проекта в Томской области создан Научно-производственный центр БАС который включает в себя:

- лётно-испытательный комплекс с сертификационным центром БАС;
- научно-образовательный комплекс с авиационным учебным центром и центром оценки квалификаций;
- лабораторно-исследовательский комплекс с ситуационным центром и центром стендовых испытаний;
- центр коллективного пользования с оборудованием для макетирования, прототипирования, реверс-инжиниринга и малосерийного производства БАС.

Министерством науки и высшего образования РФ реализуется федеральный проект «Кадры для БАС», в рамках которого запланировано, что в 2024 г. 5 тысяч, а в 2025 г. около 40 тысяч специалистов будут проходить обучение в сфере беспилотных авиационных систем (БАС), а к 2030 г. беспилотная отрасль будет включать не менее 1 млн человек.

В свою очередь Томской государственный университет как один из лидирующих научно-образовательных центров нашей страны предпринимает усилия и реализует решения для ответов на поставленные перед государством вызовы, стремясь к обеспечению технологического лидерства.

Направления научных и прикладных разработок в области БАС

В Томском государственном университете с 2015 г. активно ведутся разработки в области БАС в широком компетентностном поле, в том числе при тесном взаимодействии с промышленными партнерами, включая:

1. Проектирование, цифровые двойники (рис. 1):
 - автоматическая генерация геометрии крыла, корпуса, оперения и других элементов;
 - оптимизация аэродинамики и корпуса БПЛА аналитическими, градиентными и генетическими алгоритмами;
 - использование открытых и расширение собственных баз данных о бортовом радиоэлектронном оборудовании БПЛА для их подбора и эффективного проектирования БПЛА в целом;
 - применение и разработка искусственных нейронных сетей для систем предиктивной аналитики.
2. Сборка БАС, разработка компонентов, полезных нагрузок:
 - разработка системы дополненной реальности для сборки БПЛА мультироторного типа;
 - разработка систем технического зрения для автономной навигации;
 - разработка и сборка БАС мультироторного типа, самолетного типа, типа «конвертоплан»;

- производство микроэлектронной элементной базы для СВЧ-диапазона и силовой электроники;
- разработка радиолокационных систем.

3. Программирование и разработка материалов:
 - обширная база экспериментальных данных характеристик композиционных материалов;
 - проектирование новых композиционных материалов;
 - оптимизация и проектирование легких и прочных корпусов БПЛА;
 - создание композиционных материалов с заданными характеристиками.

4. Обработка данных с БАС:
 - алгоритмы на базе технологий искусственного интеллекта для обработки данных с БПЛА;
 - сбор и обработка больших данных;
 - технологии дистанционного зондирования и фотограмметрической обработки данных с БПЛА.

5. Интеллектуальные системы управления БАС (рис. 2):

- алгоритмы искусственного интеллекта для управления;
- автономные БАС;
- групповое управление.

Научные проекты в области БАС

Ниже представлено освещение некоторых результатов научных проектов, реализованных (или реализуемых в настоящее время) в ТГУ в области БАС.

1. Применение беспилотной авиационной системы ВТ-30Е в геодезическом мониторинге и картографировании деформаций автодороги Надым-Салехард.

В 2024 г. в Ямало-Ненецком автономном округе был проведен комплекс работ по исследованию современного состояния и картографированию деформаций автодороги Надым – Салехард с применением съёмочной аппаратуры, установленной на беспилотном воздушном судне вертолётного типа «ВТ-30Е» (изготовитель АО «НПП «Радар ммс»). Воздушное лазерное сканирование при помощи лазерного сканера АГМ-МС 3 (версия 2.0) было проведено на 10 участках автодороги общей протяжённостью 143 км (рис. 3). Относительная высота (AGL) проведения работ составляла 100 м, а скорость полёта БВС 12–15 м/с. Съёмочные работы проводились в соответствии с ГОСТ Р 59562–2021.

На 15 ключевых участках была организована система планово-высотных статических геодезических наблюдений реперных знаков, расположенных на поверхности автодороги, с использованием ГНСС-аппаратуры. При последующем уравнивании средняя ошибка определения планового положения составила 8 мм, а высотного – 15 мм.



Рис. 1. Результаты проектирования БАС

Fig. 1. UAS Design Results



Рис. 2. Результаты разработки автономных БАС

Fig. 2. Results of development of autonomous UAS

В специализированном программном обеспечении проведены подготовка облаков точек лазерного сканирования и их классификация на различные типы поверхностей (грунт, растительность, антропогенные объекты и др.). На основе полученных данных построены подробные ортофотопланы и цифровые модели рельефа автодороги и прилегающих территорий.

На ключевых участках исследования выполнен геоморфологический анализ рельефа с выявлением ведущих факторов, вызывающих деформацию дорожного полотна (рис. 4). Полученные данные позволили сделать первые выводы о региональных различиях во вкладе физико-географических и гео-

лого-геоморфологических факторов в устойчивость наиболее проблемных участков автодороги Надым – Салехард.

Дальнейшее проведение работ позволит определить классы земной поверхности, отражающие разную интенсивность проявления термоденудационных процессов. Помимо этого, планируется провести разделение поверхности с наличием деформаций методами управляемой классификации, оценить точность моделей машинного обучения, а также рассчитать индексы топографической позиции (ТРИ) для определения площадного распространения выделенных классов земной поверхности в областях положительных и отрицательных значений индекса.

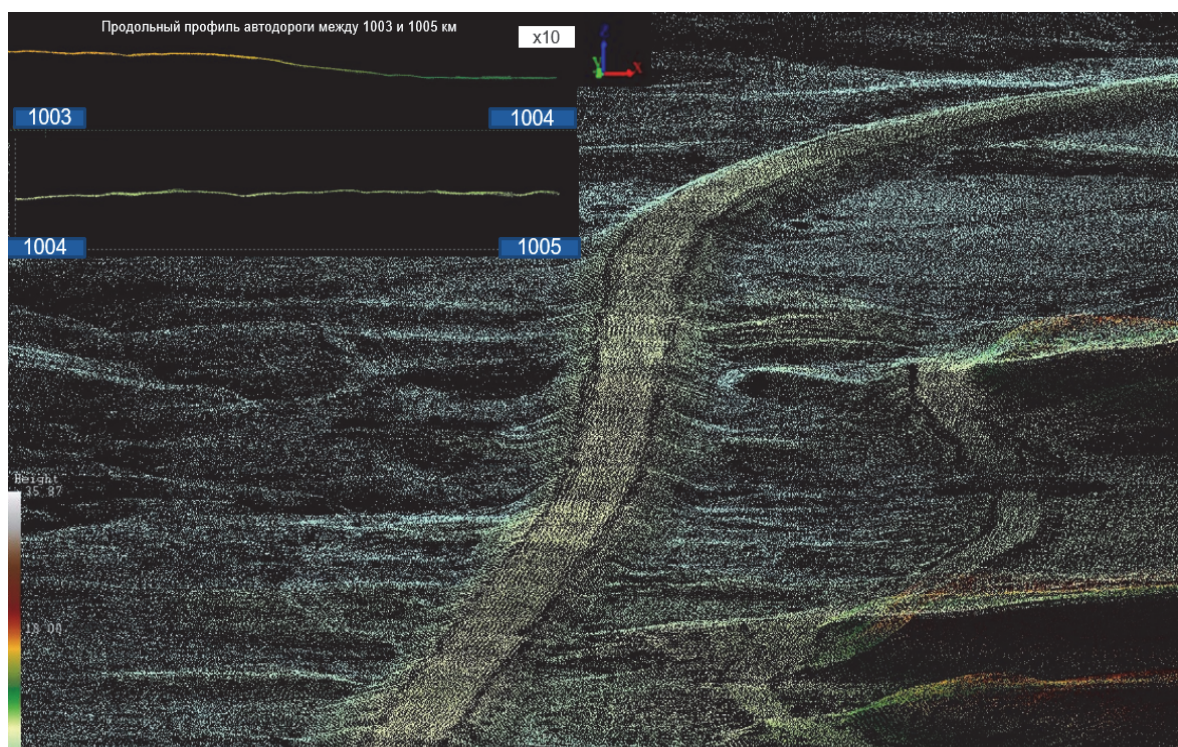


Рис. 3. Фрагмент облака точек класса «земля» участка исследований № 1

Fig. 3. The fragment of the cloud of ground class points of study area No. 1

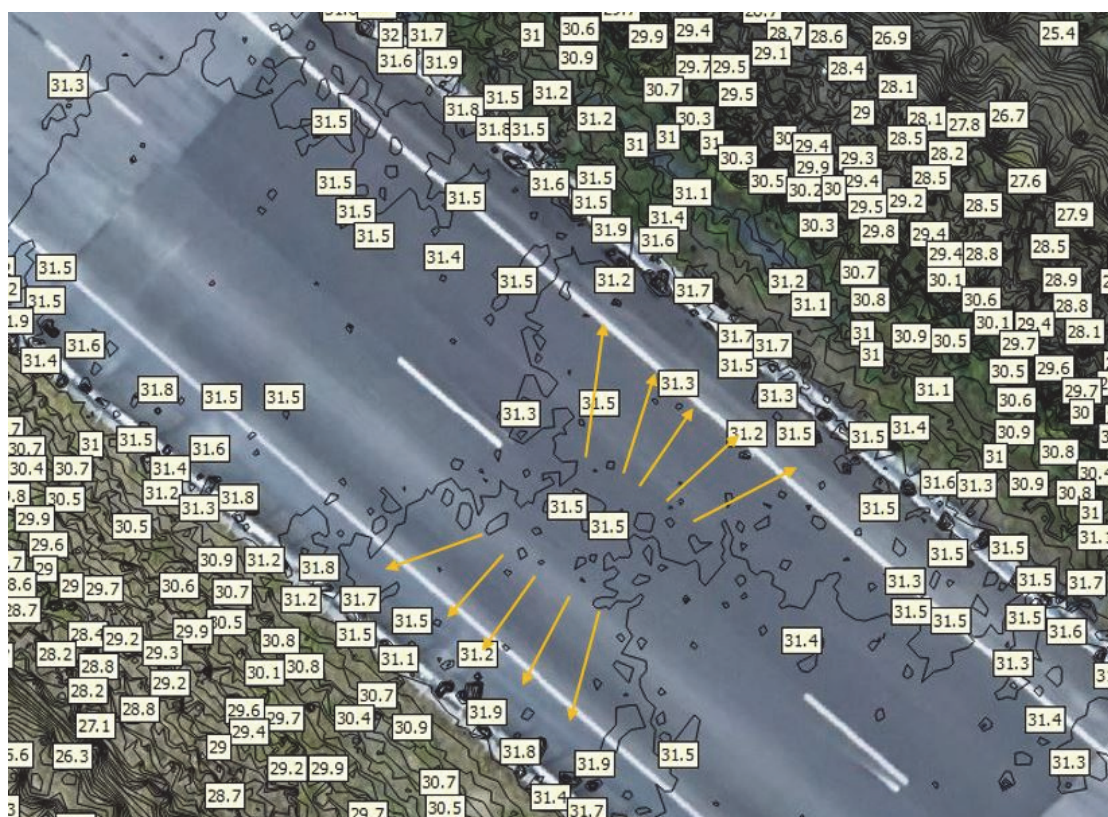


Рис. 4. Применение данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки для анализа степени деформации дорожного покрытия (участок автодороги Надым – Салехард на 1014-м км + 82 м) (желтыми стрелками показаны векторы деформаций)

Fig. 4. The application of aerial laser scanning and aerial photography data for analysis of the degree of deformation of the road surface (section of the Nadym-Salekhard highway at 1014 km + 82 m) (deformation vectors are shown with yellow arrows)

2. Облачная платформа CloudCFD для моделирования газодинамических, гидродинамических и тепловых процессов.

Современные инженеры сталкиваются с рядом сложностей при разработке и оптимизации беспилотных авиационных систем. Традиционные методы численного моделирования требуют значительных вычислительных ресурсов, дорогостоящего программного обеспечения и высокой квалификации пользователей. Это создает барьеры для малых и средних предприятий, которые не могут позволить себе покупку лицензий на проприетарное ПО и содержание дорогостоящей вычислительной инфраструктуры. Кроме того, многие существующие решения ограничены в масштабируемости и кроссплатформенной совместимости, что замедляет процесс проектирования и увеличивает время вывода продукта на рынок. В условиях растущей конкуренции и жестких сроков такие издержки становятся неприемлемыми.

Для сокращения таких издержек командой проекта разработана облачная платформа CloudCFD [1], предназначенная для моделирования газодинамических и тепловых процессов. С помощью разработанной платформы пользователи могут проводить расчеты обтекания воздушным потоком, оптимизировать аэродинамические характеристики и анализировать тепловые нагрузки на компоненты БПЛА. Платформа позволяет: импортировать геометрию расчетных областей в форматах: STEP, IGS, STL; проводить автоматизированное построение структурированных и неструктурированных расчетных сеток; проводить расчеты течений вязкого сжимаемого и несжимае-

мого теплопроводного газа с использованием моделей турбулентности k- ϵ , k- ω , k- ω SST, LES; автоматизировать процесс формирования набора начальных данных, проведения многопараметрических расчетов, анализа и обработки результатов; визуализировать результаты расчетов и экспортировать массивы расчётных данных для использования в стороннем программном обеспечении.

Платформа состоит из следующих функциональных частей:

1. *Клиент* – web-интерфейс обеспечивающий доступ к вычислительному облаку и позволяющий в интерактивном режиме подготавливать задачу, отправлять расчетную задачу на вычислительный кластер, получать и визуализировать результаты расчетов (рис. 5).

2. *Вычислительное облако* предоставляется на время решения задачи и обеспечивает взаимодействие с клиентом посредством открытого API, управляет вычислительным процессом.

Таким образом, облачная модель предоставления услуг исключает необходимость капитальных затрат на программное обеспечение и вычислительное оборудование, делая доступным использование подходов CFD моделирования даже для небольших компаний и стартапов. Помимо процессов моделирования элементов БАС, разработанная платформа позволяет решать широкий спектр газодинамических, гидродинамических и тепловых задач и может быть использована в автомобилестроении, нефтегазовой и химической промышленности, энергетике и строительстве.

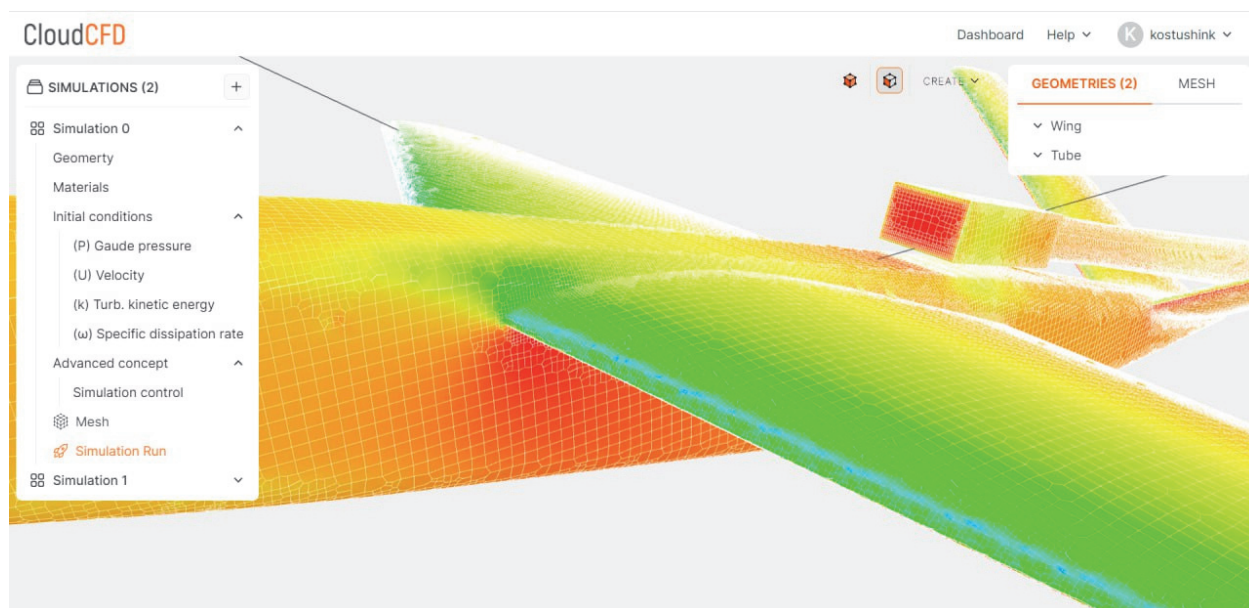


Рис. 5. Web-интерфейс облачной платформы CloudCFD

Fig. 5. CloudCFD web interface

3. *Моделирование сброса хладагента при тушении пожаров.* Одним из эффективных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс жидкого хладагента в очаг пожара с борта летательного аппарата. В настоящее время в РФ для этого используются вертолеты МИ-8, оснащенные водосливным устройством ВСУ-А5.

В рамках выполнения исследований под руководством профессора В.А. Архипова на базе ТГУ, поддержанных грантом РНФ № 22-19-00307, был разработан программный комплекс для оперативного расчета оптимальных параметров сброса жидкости при авиационном тушении пожаров. Комплекс позволяет: визуализировать аэронавигационные и физико-географические данные (спутниковые и аэронавигационные карты, схемы маршрутов, высоту, крутизну склонов и т. д.), сохранять координаты пожара, полетные треки, области сброса хладагента и рассчитывать оптимальные параметры сброса хладагента (рис. 6). Графический интерфейс и функциональные части программного комплекса разрабатывались с привлечением летчиков-наблюдателей МЧС России по Томской области.

Программный комплекс адаптирован для работы на базе защищенного планшетного компьютера DURABOOK R11, используемого летчиками-наблюдателями МЧС России, и протестирован на других

устройствах под управлением операционных систем Windows 10/11 и Android 13.

Основой комплекса является математическая модель [2], позволяющая рекомендовать оптимальные параметры тушения, обеспечивающие требуемую плотность орошения с учетом реальных метеоусловий. Данная модель разработана на базе большого комплекса экспериментально-теоретических исследований процесса осаждения компактного объема жидкости в усложненных условиях.

Апробация модели путем проведения натурных экспериментов, необходимая для ее практического внедрения, связана с большими материальными затратами и экономически нецелесообразна. Авторами проекта предложена методика моделирования сброса хладагента при авиационном пожаротушении с использованием беспилотного летательного аппарата, снабженного модельным водоливным устройством (рис. 7).

На основе разработанной методики проведены экспериментальные исследования по измерению пространственного распределения плотности и интенсивности орошения при сбросе хладагента (рис. 8). Показана возможность тушения ограниченного очага пожара при сбросе жидкости с беспилотного летательного аппарата (рис. 9).

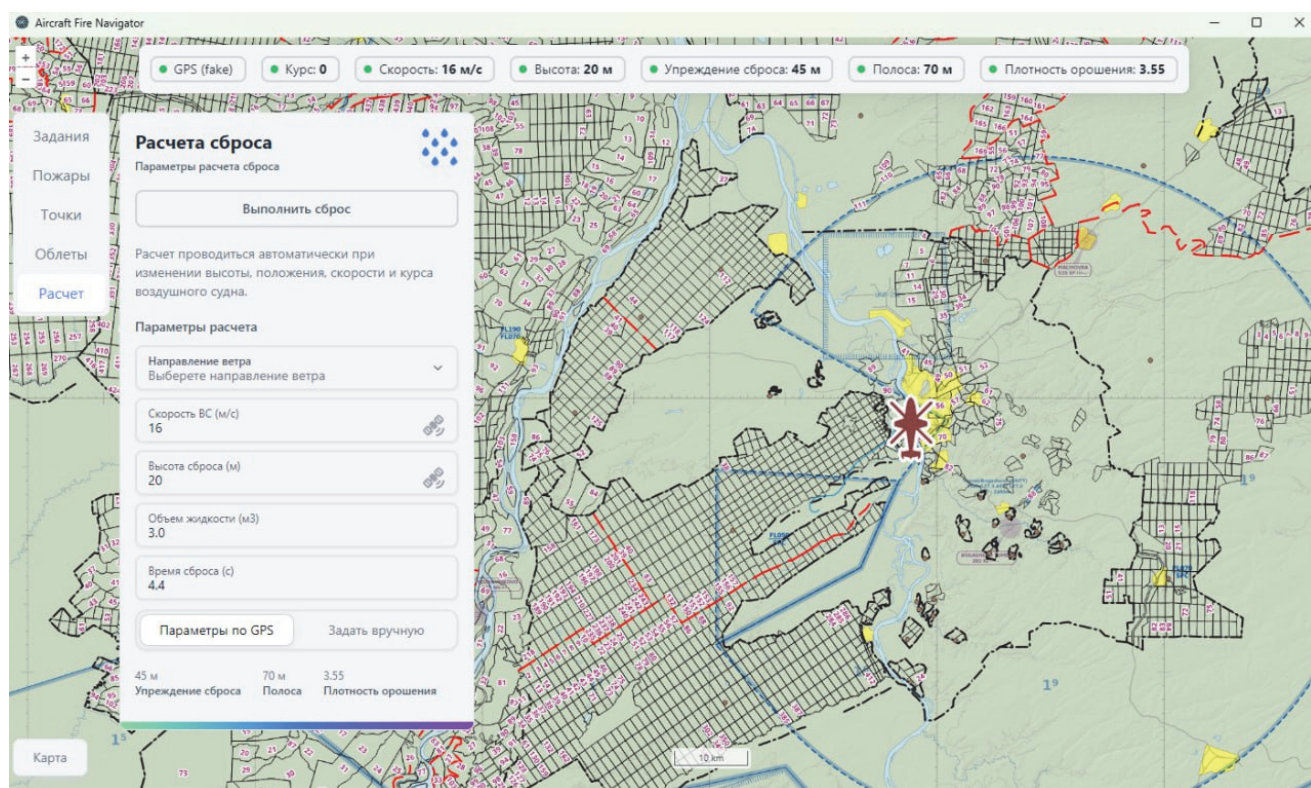


Рис. 6. Графический интерфейс программного комплекса для оперативного расчета координат сброса огнетушащей жидкости

Fig. 6. Graphical interface of the software package for online calculation of discharge coordinates, fire extinguishing fluid



Рис. 7. БПЛА, оснащенный модельным сливным устройством, и процесс сброса жидкости с высоты 10 м

Fig. 7. UAV equipped with a model drain device and the process of liquid discharge from a height of 10 m

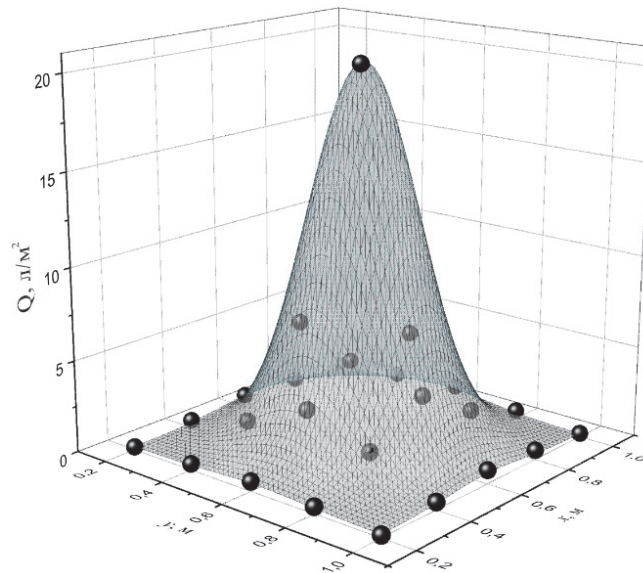


Рис. 8. Распределение плотности орошения при сбросе жидкости с БПЛА с высоты 14 м

Fig. 8. Sprinkling density distribution during liquid discharge from the UAV from a height of 14 m



Рис. 9. Видеокадры процесса тушения ограниченного очага пожара при сбросе жидкости с БПЛА (t – время)

Fig. 9. Video frames of the process of extinguishing a limited fire source when discharging liquid from a UAV (t – time)

4. *Инструменты генеративного дизайна БПЛА с использованием многоуровневой оптимизации.* Данный проект представляет собой разработку комплекса инструментов для автоматизированного проектирования БПЛА на основе многоуровневой оптимизации аэродинамических характеристик [3]. Разработанный подход включает последовательное применение сканирования с грубым шагом для предварительного исследования пространства параметров, генетических алгоритмов для выявления перспективных решений и градиентных методов для финальной оптимизации [4].

Ключевой особенностью системы является снижение вычислительной нагрузки за счет эффективной интеграции аналитических и инженерных методов расчета аэродинамики с более точными, но ресурсоемкими методами вычислительной гидродинамики (CFD). Инструменты были успешно апробированы при проектировании четырех различных типов БПЛА, продемонстрировав значительное превосходство над традиционными методами проектирования [5].

В ходе применения инструментов генеративного дизайна удалось рассмотреть около 700 вариантов конструкции для каждого БПЛА вместо 9 при ручном проектировании. Временные затраты составили в среднем 14 суток расчетов против 3 месяцев работы команды из 4 инженеров, что соответствует повышению эффективности процесса проектирования более чем в 25 раз [6].

5. *CAD-генератор цифровой модели БПЛА.* В рамках этого проекта разработан специализированный программный инструмент для автоматической генерации трехмерных цифровых моделей БПЛА на основе параметрического представления. CAD-генератор обеспечивает создание полной цифровой модели летательного аппарата по заданному набору параметров, что является необходимым условием для реализации процесса автоматизированной оптимизации [7–9].

Инструмент поддерживает различные конфигурации БПЛА и обеспечивает высокую степень гибкости при описании геометрии основных компонентов: крыла, фюзеляжа, оперения и силовой установки. CAD-генератор интегрирован с системами инженерного анализа, что позволяет автоматизировать процесс «параметры → 3D-модель → расчет → оценка → новые параметры», критически важный для реализации итеративных процессов оптимизации.

6. *Технологии проектирования изделий из полимерных композитов.* Проект посвящен освоению и развитию технологий проектирования и производства компонентов БПЛА из современных полимерных композиционных материалов, включая углепла-

стик, стеклопластик, арамид и т.д. Разработаны методики проектирования композитных конструкций с учетом специфики их механического поведения и особенностей технологических процессов изготовления.

Применение композитных материалов позволяет значительно снизить массу конструкции при сохранении или повышении прочностных характеристик, что особенно важно для БПЛА, где массовая эффективность напрямую влияет на дальность полета, полезную нагрузку и энергоэффективность. Разработанные подходы обеспечивают возможность создания сложных интегральных конструкций, не достижимых при использовании традиционных материалов.

7. *Инструменты для расчета, оптимизации и подбора воздушных винтов БПЛА.* Данный проект направлен на разработку специализированных программных инструментов для расчета, оптимизации и подбора воздушных винтов БПЛА с учетом специфики режимов полета и требований к энергоэффективности. Разработанные инструменты позволяют проводить детальный анализ аэродинамических характеристик воздушных винтов различной геометрии и оптимизировать их параметры для достижения максимальной эффективности в заданных условиях эксплуатации.

Система включает модули для расчета тяги, мощности и КПД воздушного винта, а также инструменты оптимизации, позволяющие подобрать оптимальную конфигурацию с учетом ограничений по диаметру, частоте вращения и доступной мощности силовой установки. Особое внимание уделено интеграции винтомоторной группы с общей аэродинамической компоновкой БПЛА для минимизации интерференционных эффектов и достижения максимальной системной эффективности.

Представленные проекты в совокупности формируют комплексный подход к проектированию высокоэффективных БПЛА, обеспечивая значительное сокращение времени разработки и повышение качества конечного продукта.

8. *СВЧ Георадар и нелинейный локалатор.* Георадары, или грунтопроникающие радары (Ground Penetrating Radar, GPR), являются мощным инструментом для исследования подповерхностных структур. Они активно применяются в геологии, археологии, строительстве, военной, гуманитарной сфере и при поисково-спасательных операциях. В последние годы использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с георадарами открыло новые возможности для сканирования как опасных, так и безопасных пространств. В частности, для задачи гуманитарного разминирования особый интерес

представляет применение устройств локации нелинейных (полупроводниковых) элементов, которые позволяют обнаруживать электронные устройства, скрытые в грунте или других средах.

Среди многообразия устройств георадиотомографии и нелинейной локации вниманию предлагаются устройства СВЧ георадара и нелинейного локатора, разработанных на базе РФФ ТГУ.

СВЧ георадар представляет собой модульный комплекс, состоящий из блока формирования и приема ВЧ импульсов на основе ЛЧМ генератора (с частотным диапазоном 0,5–3 ГГц) и модуля антенной решетки (рис. 10). Кроме блока ЛЧМ генератора ВЧ импульсов и антенных модулей (антенная решетка с синтезированной апертурой), в состав аппаратуры

также входят навигационный блок и управляющий компьютер.

Благодаря применению антенных решеток с синтезированием апертуры обеспечивается возможность получать помимо стандартных радарограмм с каждого канала, демонстрирующих распределения амплитудно-фазовых характеристик для используемого частотного диапазона, еще и трёхмерные растровые изображения исследуемого пространства. Имеется возможность предоставления трехмерного набора данных послойно в виде набора радиоизображений, полученных при различных сечениях зондируемого объема вдоль выбранного направления; также возможна трехмерная визуализация неоднородностей.



Рис. 10. Трёхмерная модель георадара (а), амплитудная карта зондируемого подповерхностного объекта на глубине 10 см в результате имитационного моделирования (с) и фото расположения георадара на малом БПЛА со взлетной массой до 50 кг (b)

Fig. 10. 3D model of ground-penetrating radar (a), amplitude map of the probed subsurface object at a depth of 10 cm as a result of simulation (c) and a photo of the location of the ground-penetrating radar on a small UAV with a take-off weight of up to 50 kg (b)

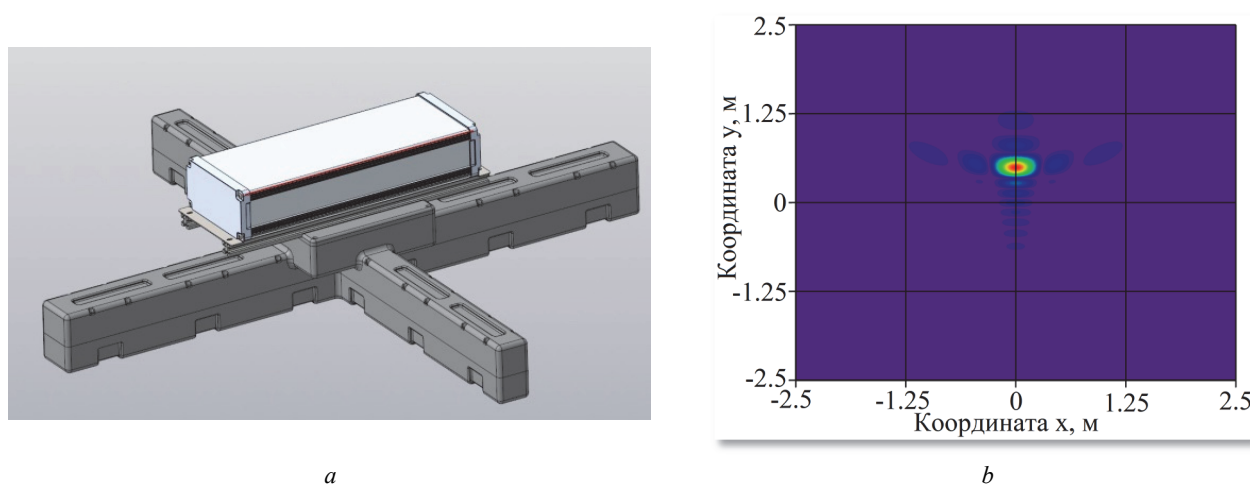


Рис. 11. Трёхмерная модель нелинейного локатора (а) и распределение принятого сигнала от источника нелинейности (b)

Fig. 11. Three-dimensional model of nonlinear locator (a) and distribution of received signal from nonlinearity source (b)

Нелинейный локатор работает на принципе гармонической локации и использует две ортогональные линейные антенные решетки: передающую из 16 элементов на частоте 2,45 ГГц и приемную из 32 элементов на частоте 4,9 ГГц (вторая гармоника). Передающая решетка формирует широкую диаграмму направленности в плоскости сканирования. Приемная решетка, оснащенная фазовращателями, обеспечивает электронное сканирование луча. Обе решетки работают с круговой поляризацией (рис. 11).

Быстродействие обоих устройств позволяет собирать данные при скорости линейного перемещения приемопередающей апертуры ~ 100 км/ч и потребляемой мощности не более 50 Вт. Последние упомянутые характеристики расширяют возможности использования БПЛА для поиска взрывоопасных объектов на больших территориях.

В заключение можно сказать, что использование представленных георадара и нелинейного локатора в сочетании с БПЛА представляет собой мощный инструмент для решения широкого круга задач. Несмотря на некоторые ограничения, их преимущества делают их незаменимыми в условиях, где традиционные методы исследования недоступны или неэффективны. Среди приложений для использования таких систем, установленных на БПЛА, можно выделить задачи гуманитарного разминирования больших территорий.

9. *Исследование и разработка алгоритмов интеллектуального управления беспилотными воздушными судами.* Целью проекта является разработка и исследование бортового алгоритма прокладывания пути при облете препятствий беспилотным воздушным судном как наиболее важной и ресурсоемкой части автономной системы управления. Автономные системы управления беспилотными воздушными судами (БВС) представляют собой комплекс технических решений и алгоритмов, которые позволяют вы-

полнять задачи без непосредственного участия человека-оператора. Эти системы обеспечивают управление полетом, навигацию, стабилизацию, а также выполнение заданий с минимальным вмешательством оператора или без него.

С точки зрения использования современных технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывается возможность для разработки интеллектуальных БВС. Однако до сих пор не выработано универсального решения, позволяющего достичь полной автономности работы БВС, особенно когда речь идет про сложные динамичные среды полета и отсутствие сигналов глобально спутников навигации.

Нейросетевые алгоритмы как инструменты искусственного интеллекта повсеместно используются для обеспечения БВС интеллектуальными функциями. В настоящей работе проводится исследование возможных путей применения нейросетевых технологий для построения современных интеллектуальных систем управления БВС. Особое внимание уделяется технологиям глубокого обучения с подкреплением.

Исходя из последних мировых тенденций, использование алгоритмов Deep Reinforcement Learning (DRL, обучение с подкреплением) в области построения систем автоматического управления БВС набирает наибольшую популярность. Это связано в первую очередь с возможностями, которые открываются перед исследователями и разработчиками таких систем в области построения автономных БВС, в том числе без использования сигналов глобальной спутниковой навигации, что превращает БВС в интеллектуальное самостоятельное устройство, способное ориентироваться в пространстве и быть независимым от большинства внешних факторов при выполнении заданий. Наиболее активно используемым подходом является алгоритм глубоких Q-сетей, или DQN (рис. 12).

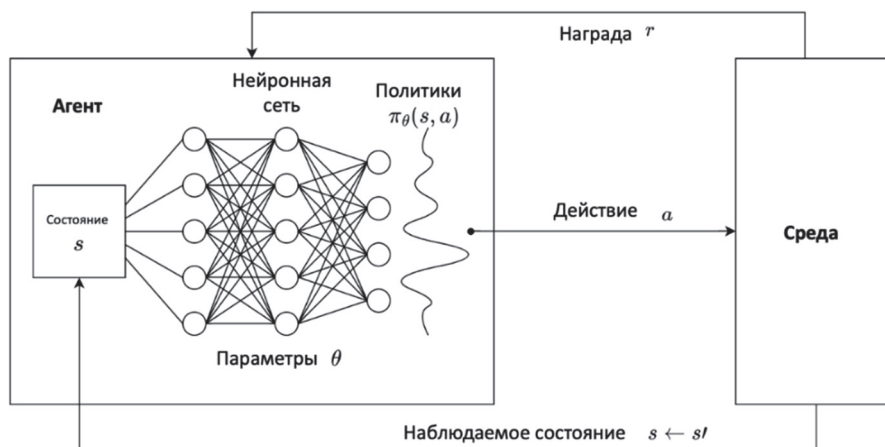


Рис. 12. Структурная схема работы DQN

Fig. 12. Block diagram of DQN operation

Используя структурную схему на рис. 12, представляется возможным описать базовые принципы внедрения алгоритма DQN в построение автономной системы управления БВС. В нашем случае БВС выступает агентом, на борту которого функционирует глубокая нейронная сеть. БВС функционирует в некоторой окружающей среде, в которой необходимо прокладывать маршруты и облетать препятствия, исходя из принятого задания. В процессе обучения нейронная сеть настраивается таким образом, чтобы при получении информации от окружающей среды она могла вырабатывать нужную стратегию передвижения, которая в дальнейшем преобразуется в управляющие сигналы БВС. Обучение может происходить непрерывно всегда и тем самым нейронная сеть, рас-

полагаясь на борту БВС, учится и адаптируется к большему количеству состояний БВС в окружающей среде; кроме того, обучение может происходить до того момента, когда эффективность выработанных решений достигнет заданного разработчиком порога в зависимости от критерия эффективности.

На первом этапе проекта внедрение DQN в систему управления БВС отработывалось на основе средств и методов имитационного моделирования в среде симуляции полетов Gazebo, OpenAI Gym и Webots (рис. 13). На следующем этапе проекта разработанный алгоритм будет интегрирован и апробирован на борту реального БВС мультироторного типа в закрытом полигоне Томского государственного университета.



Рис. 13. Имитационная среда полета

Fig. 13. The flight simulation environment

Образовательные технологии в области БАС

Для обеспечения кадровой потребности отрасли в БАС в Томском государственном университете разработана и реализуются многоуровневая система подготовки кадров, включающая в себя программы профессионального обучения по рабочим профессиям, программы переподготовки кадров ДПО, программы бакалавриата, базового высшего образования и магистерские программы.

С 2022 г. Томский государственный университет ведет подготовку операторов БАС и специалистов по эксплуатации БАС в рамках Федерального проекта «Содействие занятости» национального проекта «Демография». Всего обучено в рамках данного проекта для отрасли БАС порядка 1 000 человек.

В рамках Федерального проекта «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли» в проекте «Цифровые кафедры» в вузах для обучающихся реализуется программа переподготовки «Оператор БАС: фотограмметрия и дистанционное зондирование». В 2024 г. по данной программе было обучено 114 человек, а в

2025 г. обучение прошли 204 человека. В проекте «Код будущего» для школьников реализуется общеобразовательная программа «Основы программирования БПЛА с использованием языка Python», по которой в 2024 г. прошли обучение 31 человек.

В 2024 г. Томский государственный университет стал образовательным провайдером в Федеральном проекте «Кадры для БАС». В рамках данного проекта 37 программ ТГУ прошли отбор, 17 регионов предоставили полигоны БАС для практических занятий, успешно выпустились 741 человек. По итогам реализации проекта в 2024 г. ТГУ вошел в ТОП-3 провайдеров данной программы по количеству обученных слушателей.

В 2023 г. Томский государственный университет вошел в пилотный проект, направленный на изменение уровней профессионального образования (Указ Президента РФ №343 от 12.05.2023 г.). В рамках данного проекта разработаны и реализуются несколько пилотных программ, имеющих уникальную модельную структуру (рис. 14), спроектированную с

учетом аналитики рынка труда БАС и запроса формирующейся отрасли БАС. Данная модель предусматривает вариативные (гибкие) сроки обучения, высокую практикоориентированность и возможность для обучающихся раннего выхода на рынок труда.

В частности, особенностью одной из программ базового высшего образования «Технологии проектирования и управления БАС», набор на которую впервые осуществлен в 2024 г., является объединение двух направлений подготовки: 27.03.05 «Инноватика» и 24.03.03 «Баллистика и гидроаэродинамика».



Рис. 14. Модель образовательной программы «Технологии проектирования и управления БАС»

Fig. 14. ALS Design and Control Technologies Educational Program Model

Цель объединения – подготовить специалистов, способных эффективно решать задачи математического моделирования в области разработки новых технологий и проектирования беспилотных авиационных систем с использованием высокопроизводительной компьютерной техники, способных координировать инновационные инициативы в области беспилотных авиационных систем, а именно осуществлять мониторинг последних тенденций и достижений в области технологий БАС; выявлять перспективные решения и возможности; внедрение новых продуктов, услуг и процессов, связанных с БАС; создание и поддержание партнерских отношений с исследователями, производителями, операторами и регулирующими органами для содействия инновациям в сквозных видах профессиональной деятельности в промышленности. Обучающийся уже с первого курса выстраивает свою индивидуальную траекторию посредством выбора одного из трех профессиональных модулей в зависимости от выбранного направления подготовки: 24.03.03 «Баллистика и гидроаэродинамика» – профессиональные модули «Цифровые технологии в проектировании БАС», «Компьютерное

моделирование динамических процессов управления БАС»; 27.03.05 Инноватика – профессиональный модуль «Сопровождение и внедрение технологий БАС». В связи с объединением в рамках ОП двух направлений подготовки у студента появляется вариативность выбора своей траектории обучения на основании собственных предпочтений и получаемых навыков. При этом в связи с обучением студентов двух направлений подготовки представляется возможным формирование междисциплинарных инженерных команд, способных решать прикладные задачи отрасли БАС в продуктовой логике, тем самым усиливая эффект проектного и группового обучения.

Программа «Программное и аппаратное обеспечение БАС», первый набор на которую также осуществлен в 2024 г. по направлению 09.03.02 Информационные системы и технологии, собрана по ядерному типу. Например, ядро «Программирование» реализуется Высшей IT школой ТГУ, которая использует уникальные разработанные подходы и методики, направленные на ускоренную подготовку специалистов. В то время как ядро «Цифровая электроника и ПЛИС» реализуется в Передовой инженерной школе

(ПИШ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Таким образом, в программе удалось собрать воедино лучшие практики и компетенции Большого университета Томска для подготовки высококвалифицированных инженеров-разработчиков встраиваемых систем.

Объединяющей особенностью пилотных программ базового высшего образования в Томском государственном университете является возможность получения дополнительных квалификаций во время обучения. В связи с этим ряд преподаваемых дисциплин преимущественно на первом и втором курсах обучения формируются по модульному принципу, чтобы в процессе обучения студенты получали рабочие профессии «оператор БАС» и «чертежник-конструктор», а также дополнительную квалификацию «специалист по техническому обслуживанию БАС». Это позволит обучающимся начинать свой профессиональный путь уже после первого курса обучения.

Для обеспечения подготовки студентов в деятельностном формате используются студенческие конструкторские бюро (СКБ) и FabLab. Создание таких образовательных пространств и встраивание их деятельности в процесс подготовки кадров вызваны запросом индустрий инженерного сектора на качественную подготовку кадров с компетенциями и навыками, обеспечивающими быстрое вхождение студентов в профессиональную деятельность. Студенческие конструкторские бюро как специально созданная в университетах инфраструктура позволяет эти задачи решать, привлекая к практической подготовке студентов – представителей инженерной отрасли, обеспечивая установление связей между образовательной, научно-исследовательской, опытно-конструкторской, инновационной и предпринимательской деятельностью в рамках СКБ, а также повышение эффективности образовательного процесса посредством применения практических заданий и решения проектных задач с использованием современных технологий и оборудования.

СКБ ТГУ позиционируется как пространство, оснащенное ресурсами, инструментами и оборудованием, где студенты могут реализовать свои технические идеи, начиная с разработки концепции и заканчивая созданием полноценного продукта.

В деятельность бюро закладывается следующий основной функционал:

- выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских студенческих работ в области проектирования и разработки;
- выполнение заказов от предприятий-партнёров на возмездном основании;
- поддержка научно-исследовательской деятельности студентов и сотрудников СКБ;

– подготовка студентов – участников СКБ к профессиональной и научной деятельности.

Перечень работ, выполняемых в СКБ ТГУ по направлению БАС:

- разработка, проектирование, прототипирование и испытание технических систем;
- проведение аэродинамических, гидродинамических и прочностных расчетов изделий;
- 3D-моделирование элементов конструкций;
- изготовление электронных устройств, пайка и программирование микроконтроллеров;
- 3D-печать, фрезеровка и лазерная резка материалов;
- изготовление элементов конструкций из композитных материалов;
- изготовление формообразующих конструкций из полимеров;
- постобработка изделий.

В СКБ разработаны и внутренние критерии оценки выполненной работы студентов. Как правило, в них включаются пункты, связанные с эффективностью командной работы и правильностью встраивания коммуникации с партнёром. На этапах работы над проектом промежуточное оценивание осуществляет закреплённый за командой наставник. По завершению всей работы студенческая команда представляет проект на открытом мероприятии.

Итоговые результаты работы студентов по выполнению проектов и сами продукты оцениваются непосредственно их заказчиками.

Помимо образовательной деятельности, большое внимание уделяется профориентационным мероприятиям, направленным на популяризацию БАС среди школьников, учащихся СПО, вузов и молодых специалистов. В течение 2023 и 2024 гг. организована серия профориентационных мероприятий: в апреле 2023 г. проведен хакатон «Беспилотные авиационные системы для школьников» совместно с ГК Геоскан (60 участников), в рамках «Архипелага 2023» проведено соревнование по эксплуатации БАС в сельскохозяйственной отрасли, организатор НОЦ «ПИШ Агробiotек» ТГУ (6 команд, 30 участников, 3 региона), в ноябре 2023 г. проведен хакатон «Беспилотники.Агро» для учащихся 8–11 классов из Томска и Томского района, а также студентов Томского госуниверситета (100 участников), в апреле – мае 2024 г. проведены соревнования «Летай в ТГУ», участниками которого стали 120 школьников и студентов СПО, 50 студентов вузов г. Томска выполняли задания, представленные партнерами соревнований.

В 2024 г. г. Томск стал одним из 30 регионов, оснащенных для обучения работе с беспилотными авиационными системами в рамках Федерального про-

екта «Стимулирование спроса на отечественные беспилотные авиационные системы». 19 школ и 1 техникум получили оборудование для реализации образовательных процессов по разработке, производству и эксплуатации беспилотных авиационных систем. В ноябре 2024 г. в рамках регионального форума «За Агро – будущее» Томский государственный университет провел соревнования «АгроБАС», участниками которого стали 150 школьников и студентов СПО. Одним из условий данного соревнования было использование школами оборудования, приобретенного в рамках проекта.

Все вышеперечисленные активности не были бы возможны без развивающейся инфраструктуры. За последние два года, в Томском государственном университете открыты Учебный центр пилотирования БАС, Полигон БАС, СКБ «БАС», СКБ «Беспилотные технологии».

В 2024 г. открыто структурное подразделение НОЦ «Институт развития инновационной авиации» с целью реализации мероприятий по обеспечению условий для создания нового типа подготовки, осуществления прорывных разработок и исследований,

направленных на решение задач по разработке, производству, испытаниям, сертификации и эксплуатации беспилотной и опционально пилотируемой авиационной техники (включая решение задач организации воздушного движения, развития наземной инфраструктуры воздушного транспорта, транспортной и авиационной безопасности), а также для обеспечения стратегически значимого сектора экономики страны высококвалифицированными кадрами для достижения технологической независимости.

В начале 2025 г. в г. Томске открылся Научно-производственный центр Беспилотных авиационных систем, оснащённый самым современным оборудованием, способным обеспечить весь цикл производства БАС и её компонентов. Для региона это стало значимым событием. Желание плотного взаимодействия Томского государственного университета с новым отраслевым предприятием в регионе привело к открытию в ТГУ базовой кафедры интеллектуальных технических систем. Это способствует не только развитию образовательных программ, но и созданию новых рабочих мест, улучшению качества подготовки кадров и внедрению современных технологий.

Список источников

1. CloudCFD // Официальный сайт CloudCFD. [Б. м.], 2025. URL: <http://cloudcfid.ru/> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Матвиенко О.В., Архипов В.А., Данейко О.И., Усанина А.С., Басалаев С.А., Булавко А.М. Моделирование динамики орошения подстилающей поверхности при авиационном тушении пожаров // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 5. С. 1242–1254.
3. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Динамика осаждения кластера монодисперсных капель // Письма в журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 5. С. 19–22.
4. Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Романдин В.И. Экспериментальное исследование распада вертикальной жидкой струи // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. Т. 92. С. 69–78.
5. Исмаилов К. К. Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолетного типа аналитическими методами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 78. С. 112–124.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662797 Российская Федерация. Программа для оптимизации аэродинамики планера БПЛА градиентными методами: № 2022662109; заявл. 30.06.2022; опубл. 07.07.2022 / К. Исмаилов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».
7. Исмаилов К.К., Кагенов А.М. Оптимизация формы крыла беспилотного летательного аппарата самолетного типа // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. Т. 3. С. 37–39.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619386 Российская Федерация. Программный комплекс для создания цифровой модели БПЛА на основе подходов параметрического моделирования / К. Исмаилов, А.М. Кагенов; № 2022618826; заявл. 18.05.2022; опубл. 20.05.2022, Бюл. № 5.
9. Павлов М.С. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 73. С. 71–80.

References

1. CloudCFD [Electronic resource] // Official website of CloudCFD – Electron. dan. – [B. M.] (2025). – URL: <http://cloudcfid.ru/> (accessed 03/04/2025).
2. Matvienko, O.V., Arkhipov, V.A., Daneyko, O.I., Usanina, A.S., Basalae, S.A. & Bulavko, A.M. (2023) *Modelirovaniye dinamiki orosheniya podstilayushchey poverkhnosti pri aviatsionnom tushenii pozharov* [Modeling irrigation dynamics the underlying surface during aviation fire extinguishing]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 96 (5). pp. 1242–1254.
3. Arkhipov, V.A., Basalae, S.A., Zolotorev, N.N., Perfilieva, K.G. & Usanina, A.S. (2024) *Dinamika osazhdeniya klastera monodispersnykh kapel'* [Dynamics of deposition of a cluster of monodisperse droplets]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 50 (5). pp. 19–22.

4. Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Perfilieva, K.G., Polenchuk, S.N. & Romandin, V.I. (2024) *Eksperimental'noye issledovaniye raspada vertikal'noy zhidkoy strui* [Experimental investigation of vertical liquid jet decay]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mekhanika*. 92. pp. 69–78.
5. Ismailov, K.K. (2022) *Opredeleniye aerodinamicheskikh kharakteristik bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa analiticheskimi metodami* [Determination of aerodynamic characteristics of an unmanned aerial vehicle of an airplane type by analytical methods]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mekhanika*. 78. pp. 112–124.
6. Certificate of state registration of the computer program No. 2022662797 Russian Federation. A program for optimizing the aerodynamics of a UAV airframe using gradient methods: No. 2022662109: application. 30.06.2022: published 07.07.2022 / K. Ismailov; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk State University".
7. Ismailov K. K., Kagenov A.V. (2021) *Optimizatsiya formy kryla bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa* [Optimization of the wing shape of an aircraft-type unmanned aerial vehicle]. Prospects for the development of fundamental sciences: Proceedings of the XVIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. 2. pp. 37–39.
8. Ismailov, K. & Kagenov, A.M. (2022) *Programmyj kompleks dlya sozdaniya cifrovoj modeli BPLA na osnove podhodov parametricheskogo modelirovaniya* [A software package for creating a digital UAV model based on parametric modeling approaches]. Certificate of state registration of the computer program № 2022619386 Russian Federation. № 2022618826, appl. 18.05.2022, publication date 20.05.2022, Bul. № 5.
9. Pavlov, M.S. (2021) *Optimal'noye proyektirovaniye korpusa bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Optimal design of the body of an unmanned aerial vehicle]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mekhanika*. 73. pp. 71–80.

Информация об авторах:

Шашев Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных технических систем Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dshashev@mail.ru

Рыжих Юлия Николаевна – кандидат физико-математических наук, декан физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: jula@ftf.tsu.ru

Ерофеев Александр Анатольевич – кандидат географических наук, заведующий проблемной научно-исследовательской лаборатории гляциоклиматологии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: erofeew@yandex.ru

Шидловский Станислав Викторович – доктор технических наук, декан факультета инновационных технологий Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shidlovskiysv@mail.ru

Нестерова Наталья Владимировна – старший преподаватель кафедры управления качеством Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nesterovanv@mail.tsu.ru

Костюшин Кирилл Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kostushink@hotmail.com

Аскеров Адиль – разработчик программного обеспечения, ООО «Облачный вычислительный центр» (Томск, Россия). E-mail: askerov121099@gmail.com

Червакова Анастасия Владимировна – генеральный директор, ООО «Облачный вычислительный центр» (Томск, Россия). E-mail: ch-nastya1997@mail.ru

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, заведующий отделом 10 Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Басалаев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории 11 Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Булавко Антон Михайлович – кандидат физико-математических наук, ГУ МЧС России по Томской области (Томск, Россия).

Перфильева Ксения Григорьевна – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры математической физики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Федоров Сергей Михайлович – студент физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия).

Юстус Александр Витальевич – инженер физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yustus2130990@mail.ru

Исмаилов Куат – ассистент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mendikjan@gmail.com

Шипилов Сергей Эдуардович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shipilov@mail.tsu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Shashev Dmitry V., Cand.Sc. (Engineering), associate professor, department of intelligent technical systems, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dshashev@mail.ru

Ryzhikh Yulia N., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), dean, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: jula@ftf.tsu.ru

Yerofeyev Alexander A., Cand.Sc. (Geography), head of the laboratory, research laboratory of Glacioclimatology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: erofeew@yandex.ru

Shidlovsky Stanislav V., Dr.Sc. (Engineering), dean, faculty of innovative technologies, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shidlovskiysv@mail.ru

Nesterova Natalia V., Senior lecturer, department of quality management, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nesterovanv@mail.tsu.ru

Kostyushin Kirill V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, department of applied aerodynamics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kostushink@hotmail.com

Askerov Adil, Software developer, Cloud Computing Center LLC (Tomsk, Russian Federation). E-mail: askerov121099@gmail.com

Chervakova Anastasia V., General Director, Cloud Computing Center LLC (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ch-nasya1997@mail.ru

Arkhipov Vladimir A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), head of department 10, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Basalaev Sergey A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, laboratory 11, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Bulavko Anton M., Ministry of Emergency Situations of Russia for the Tomsk Region (Tomsk, Russian Federation).

Perfilieva Kseniya G., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), assistant professor, department of mathematical physics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Fedorov Sergey M., Student, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Justus Alexander V., Engineer, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yustus2130990@mail.ru

Ismailov Kuat, Assistant professor, department of applied aerodynamics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mendikjan@gmail.com

Shipilov Sergey E., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, department of radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shipilov@mail.tsu.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 27.11.2025; принята к публикации 02.12.2025

The article was submitted 30.10.2025; approved after reviewing 27.11.2025; accepted for publication 02.12.2025

Научная статья
УДК 621.396.96
doi: 10.17223/29491665/9/6

Комбинирование радиоволнового и оптического изображений в задаче визуализации скрытых объектов в инженерных конструкциях

Виталий Леонидович Хмелёв¹, Александр Иванович Еремеев², Василий Васильевич Васин³,
Надежда Николаевна Ерзакова⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ xmejleb@mail.ru

² aleksandr_ermeev_93@mail.ru

³ north_vasya@mail.ru

⁴ yerkakova-nadya@yandex.ru

Аннотация. Актуальной задачей в областях неразрушающего контроля, строительства и обеспечения безопасности является не только обнаружение скрытых объектов (арматуры, пустот, инженерных коммуникаций), но и точное определение их пространственного положения относительно видимой среды. Радиоволновая томография позволяет эффективно выявлять неоднородности внутри конструкций и восстанавливать радиоизображения скрытых объектов. Такие радиоизображения существуют в автономной системе координат и не имеют явной привязки к исследуемой сцене. Это вынуждает оператора вручную сопоставлять разнородные данные, что существенно повышает риск ошибок и увеличивает временные затраты на анализ. В статье представлено инновационное решение – применение технологий дополненной реальности для наложения радиоизображения на оптическую картину исследуемого пространства. Такой подход позволяет визуально совместить данные радиоволновой томографии с реальным окружением, обеспечивая интуитивно понятное восприятие информации и повышая точность диагностики.

Ключевые слова: радиотомография, дополненная реальность, неразрушающий контроль

Для цитирования: Хмелёв В.Л., Еремеев А.И., Васин В.В., Ерзакова Н.Н. Комбинирование радиоволнового и оптического изображений в задаче визуализации скрытых объектов в инженерных конструкциях // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 61–67. doi: 10.17223/29491665/9/6

Original article
doi: 10.17223/29491665/9/6

Combining radio wave and optical imaging in the task of visualizing hidden objects in engineering structures

Vitaly L. Khmelev¹, Alexander I. Ermeev², Vasily V. Vasin³, Nadezhda N. Erzakova⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ xmejleb@mail.ru

² aleksandr_ermeev_93@mail.ru

³ north_vasya@mail.ru

⁴ yerkakova-nadya@yandex.ru

Abstract. A pressing challenge in the fields of non-destructive testing, construction, and safety assurance is not only to detect hidden objects (such as reinforcement bars, voids, or utility lines) but also to accurately determine their spatial position relative to the visible environment. Radio-wave tomography effectively identifies inhomogeneities within structures and reconstructs radio images of hidden objects. However, these radio images exist in an autonomous coordinate system and lack explicit alignment with the scene under investigation. This forces the operator to manually correlate heterogeneous data, significantly increasing the risk of errors and extending the time required for analysis. The article presents an innovative solution: the application of augmented reality technologies to overlay radio images onto the optical view of the inspected space. This approach enables visual fusion of radio-wave tomography data with the real environment, providing intuitive information perception and enhancing diagnostic accuracy.

Keywords: radio-wave tomography, augmented reality (AR), non-destructive testing (NDT)

For citation: Khmelev, V.L., Ermeev, A.I., Vasin, V.V. & Erzakova, N.N. (2025) Combining radio wave and optical imaging in the task of visualizing hidden objects in engineering structures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeiatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 61–67. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/6

Введение

Для решения проблемы пространственной привязки радиоизображения к локальным координатам используется метод, основанный на применении физических карт с координатной сеткой. В системах Hilti PS 1000 [1] и Георадара GPR RV-01 [2], например, сканируемая область покрывается специальной картой, на которую размещается сканирующее устройство. Сканер выполняет сканирование области, а обнаруженные объекты фиксируются на карте вручную в момент, когда сканирующее устройство находится непосредственно над объектом, при этом на встроенном экране отображается радиоизображение скрытых неоднородностей. Данный метод имеет ряд существенных ограничений, связанных с необходимостью точного и неподвижного размещения карты на ровной поверхности, что затруднительно в полевых условиях. Точность и скорость определения координат зависят от квалификации оператора, который должен совмещать местоположение сканера с отображаемым на экране изображением. Для повышения точности следования маршруту сканирования в пространстве на радаре используются лазерные лучи; отклонение от маршрута сканирования приводит к увеличению уровня шумов в получаемом радиоизображении. На рис. 1 представлена схема процесса определения скрытых объектов с использованием карты.



Рис. 1. Определение скрытых объектов с помощью георадара GPR RV-01

Fig. 1. Detection of hidden objects using GPR RV-01 ground-penetrating radar

Таким образом, существующие коммерческие решения не позволяют оперативно и точно визуализировать результаты сканирования после его проведения. Возникает необходимость в разработке методики, обеспечивающей автоматическое и точное совмещение заранее полученных радиоизображений на существующую область сканирования.

Перспективным направлением для решения этой задачи является использование технологий дополненной реальности. В данной статье предлагается метод наложения трёхмерного радиоизображения, построенного с помощью метода миграции [3], на двумерное оптическое изображение. Ключевой проблемой при таком совмещении являются геометрические несоответствия: сдвиг, поворот, разный масштаб и перспективные искажения между радиоизображением и фотографией.

Для компенсации этих несоответствий в работе предлагается применять аффинные преобразования. В качестве основы для расчета параметров преобразования используется специальный маркер (QR-код), размещаемый в зоне сканирования. Обнаружение маркера на оптическом изображении позволяет автоматически определить ориентацию и масштаб области сканирования, вычислить матрицу аффинного преобразования и применить её к радиоизображению для его точного позиционирования на фотографии.

Такой подход значительно сокращает время, необходимое для обнаружения объектов по рассчитанному радиоизображению, не требует громоздких карт. Предложенный подход проверен экспериментально.

Алгоритм интеграции радиоизображения в пространство оптического изображения

Предлагается совмещать полученное радиоволновое изображение с оптическим изображением исследуемой сцены. Перед проведением радиоволнового исследования необходимо сделать снимок сцены, содержащей плоскость сканирования. Радиоволновое сканирование проводится томографическим сканером [4].

Сканер способен обнаруживать металлические и диэлектрические объекты за диэлектрическими преградами. Нулевое положение области сканирования отмечается маркером. Маркер, наклеенный на область сканирования, позволяет оценить ориентацию антенны и совместить системы координат оптического изображения (фотоснимка) и радиоволнового изображения сцены.

Цифровое фотоизображение представляется в виде прямоугольной матрицы размером $N \times M$, состоящей из одинаковых квадратных элементов – пикселей, где N – количество столбцов матрицы, а M – количество строк. Каждому пикселю соответствуют координаты (x, y) , где x – номер строки, а y – номер столбца, соответствует значение дискретной функции $f(x, y)$. Это значение представляет собой величину яркости пикселя в точке (x, y) .

Алгоритм начинается с захвата цифрового цветного RGB-изображения. Затем выполняется преобразование трехканального RGB-изображения в одноканальное изображение в градациях серого. Это преобразование необходимо для применения методов компьютерного зрения, предназначенных для распознавания маркеров. Маркер представляет собой объект определенного размера, размещенный в сцене. В данном случае в качестве маркера использовался QR-код с применением специализированной библиотеки для работы с QR-кодами из OpenCV [5]. После определения размера пикселя и ориентации маркера осуществляется вычисление размеров пикселя и положения границ области сканирования внутри сцены. Базовая поверхность радиотомографического изображения и область сканирования имеют идентичные физические размеры и форму.

В общем случае принципы интеграции радиотомографических и оптических изображений в системах неразрушающего контроля остаются аналогичными тем, что применяются в системах безопасности. Однако необходимо учитывать особенность несоосности оптического изображения относительно плоскости сканирования.

В системах досмотра обычно предполагается сканирование ограниченной плоскости, которая может быть полностью включена в поле зрения фото- или видеокамеры. В системах неразрушающего контроля радиотомограмма может иметь больший размер, что требует применения методов фото- и видеофиксации под углом. Это может приводить к искажениям, которые ранее считались несущественными.

Для компенсации данных искажений необходимо произвести расчёт специфических коэффициентов масштабирования строк и столбцов изображения на

основе анализа аффинных искажений. Рассмотрим процесс введения поправок в модуль интерполяции на основе аффинных преобразований.

Аффинным преобразованием называется матричная структура для векторного умножения на каждого пикселя изображения, которая учитывает несколько преобразований, таких как планарный поворот, изменение масштаба по обеим осям, трансляцию. Если есть возможность сопоставить точки исходного и полученного изображения, то можно рассчитать матрицу прямого и обратного преобразования. Рассмотрим матрицу аффинного преобразования двухмерного изображения, ее пример приведен ниже:

$$A = \begin{pmatrix} Sc_x & R_{xy} & T_x \\ R_{yx} & Sc_y & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Sc_x, Sc_y – коэффициенты масштаба по строке и столбцам; R_{xy}, R_{yx} – компоненты поворота относительно обеих осей изображения; T_x, T_y – коэффициенты трансляции. Для расчета всех коэффициентов запишем соответствующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x'_1 = Sc_y \cdot x_1 + R_{xy} \cdot y_1 + T_x, \\ y'_1 = R_{yx} \cdot x_1 + Sc_y \cdot y_1 + T_y, \\ x'_2 = Sc_y \cdot x_2 + R_{xy} \cdot y_2 + T_x, \\ y'_2 = R_{yx} \cdot x_2 + Sc_y \cdot y_2 + T_y, \\ x'_3 = Sc_y \cdot x_3 + R_{xy} \cdot y_3 + T_x, \\ y'_3 = R_{yx} \cdot x_3 + Sc_y \cdot y_3 + T_y, \end{cases} \quad (2)$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ – координаты точек в базовом изображении, а $x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, x'_3, y'_3$ – координаты сопоставимых точек в изображении переноса. Сопоставление изображений показано на рис. 2.



Рис. 2. Сопоставление точек для расчета аффинной матрицы

Fig. 2. Matching points to calculate an affine matrix

В представленном примере в качестве реперных точек используются координаты QR-кода в качестве маркера. При применении детектора углы маркера

служат исходной информацией и не требуют дополнительных данных. Очевидно, что у такого маркера четыре угла, однако для решения системы линейных

уравнений задействуются три из них. Для повышения точности определения угла поворота и масштаба предлагается использовать все возможные сочетания трёх углов для решения системы уравнений. Это позволит вычислить несколько значений углов и коэффициентов масштаба, которые затем могут быть усреднены и использованы в матрице преобразования. Такой подход особенно полезен в условиях, когда изображение может быть искажено или имеет низкое качество.

Кроме того, применение различных сочетаний углов позволяет более эффективно справляться с шумом и артефактами на изображении, которые могут повлиять на точность определения параметров маркера. В результате усреднение значений приводит к более точному определению угла поворота и масштаба, что особенно важно для корректного распознавания и обработки изображений с QR-кодами в различных приложениях:

$$\theta_{\text{mean}} = \frac{\sum_{n=0}^N \theta_n}{N}, k_x = \frac{\sum_{n=0}^N k_{x_n}}{N}, k_y = \frac{\sum_{n=0}^N k_{y_n}}{N}, \quad (3)$$

где N – количество решенных линейных систем уравнений, из коэффициентов которых далее рассчитаны углы поворота и масштаба. Тогда итоговая аффинная матрица запишется следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} k_x \cos \theta_{\text{mean}} & -k_y \sin \theta_{\text{mean}} & T_x \\ k_x \sin \theta_{\text{mean}} & k_y \cos \theta_{\text{mean}} & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Далее эта матрица применяется для всех точек радиоволнового изображения:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{radio}} \\ y_{\text{radio}} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $x_{\text{radio}}, y_{\text{radio}}$ – пиксели радиоизображения в той же системе координат, что и QR-кода, т.е. каждый пиксель QR-кода должен соответствовать по размеру пикселю радиоизображения. Тогда описанный алгоритм может быть выражен блок-схемой, представленной на рис. 3.

В представленной схеме был интегрирован модуль для компенсации аффинных искажений.

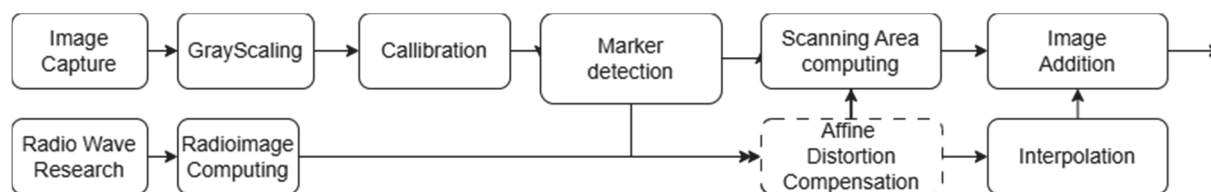


Рис. 3. Схема модифицированного алгоритма создания комбинированного изображения

Fig. 3. The scheme of the modified algorithm for creating a combined image

После обнаружения маркера в сцене информация о его положении передается в блок компенсации. Затем на основе рассчитанной аффинной матрицы определяется область сканирования в цифровом изображении и выполняется интерполяция радиоизображения для соответствия его размеров области сканирования. После этого производится формирование комбинированного изображения.

Экспериментальная проверка и результаты

Для проверки предложенного метода использовался радиоволновой многоканальный бетоноскоп, предназначенный для оценки качества бетонных конструкций. Данное устройство функционирует на основе метода радиотомографии, сканируя объект в пространстве с заданным шагом. Перемещение томографа в процессе сканирования фиксируется встроенными оптическими энкодерами, отслеживающими движение пары ведущих колес. Энкодеры обеспечи-

вают точное измерение пройденного расстояния и углов поворота, что позволяет проводить детальный анализ внутренней структуры исследуемого объекта. Использовался частотный диапазон от 2 до 8 ГГц.

В тестовой сцене была реализована двухуровневая имитация инженерных коммуникаций, расположенных последовательно. Металлические ленты были нанесены на ватманы в форме двух взаимно перпендикулярных змеевидных структур, моделирующих конфигурацию системы теплого пола. Фото проводимого эксперимента представлено на рис. 4.

В процессе эксперимента данные радиоволнового сканирования были сохранены для последующего анализа. Применяя метод миграции во временной области, реконструирован набор томографических срезов. Из этого массива были выделены слои, демонстрирующие наиболее отчетливую томографическую картину. Радиотомографическое изображение представлено на рис. 5.

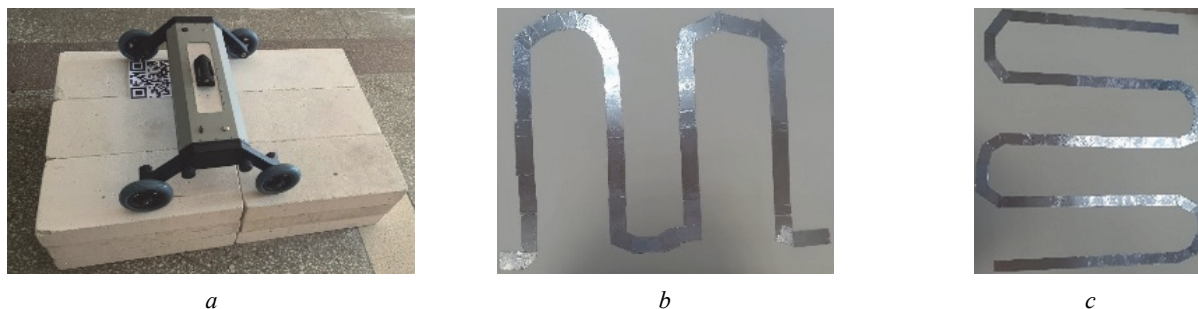


Рис. 4. Сканирование тестовой сцены для проверки алгоритма построения комбинированного изображения:
a – бетоноскоп; *b* – верхний слой; *c* – нижний слой

Fig. 4. Scan the test scene to test the algorithm for constructing the combined image:
a – concrete microscope; *b* – top layer; *c* – bottom layer

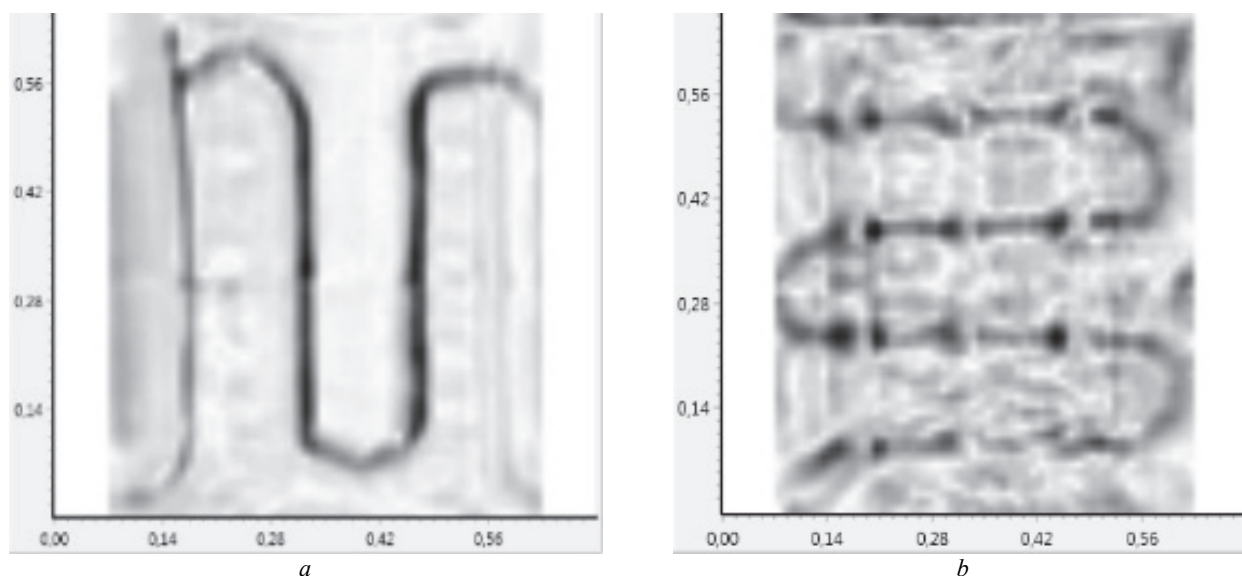


Рис. 5. Слои радиотомографического изображения, которые содержат изображение коммуникации:
a – верхний слой; *b* – нижний слой

Fig. 5. Radiotomographic image layers that contain a communication image: *a* – is the top layer; *b* – is the bottom layer

На изображении нижнего слоя видно, что он находится в области тени, создаваемой верхним слоем. Тень возникает вследствие частичного блокирования электромагнитных волн, излучаемых верхним слоем, металлической лентой нижнего слоя. На рисунке, демонстрирующем нижний слой, непрерывная металлическая лента прерывается в местах пересечения с верхней лентой, что соответствует изменению траектории распространения электромагнитных волн, вызванному наличием верхней ленты.

Последующим этапом работы алгоритма является детектирование QR-кода, вычисление области сканирования внутри изображения для заданного ракурса и интерполяция радиотомографических изображений обоих слоев для их совмещения с областью сканирования.

В результате получается комбинированное радиооптическое изображение. Оптическое изображение после обработки представлено в градациях серого. Радиотомографическое изображение добавлено исключительно в один зеленый канал, что позволяет сохранить всю информацию оптического изображения. При комбинации двух радиотомографических изображений два слоя помещаются в два разных канала. Примеры изображений дополненной реальности для каждого из слоев представлены на рис. 6.

В традиционной модели цветного изображения предусмотрена многоканальная структура, которая позволяет модифицировать цифровое изображение до изображения дополненной реальности, добавляя в каждый из каналов информацию.

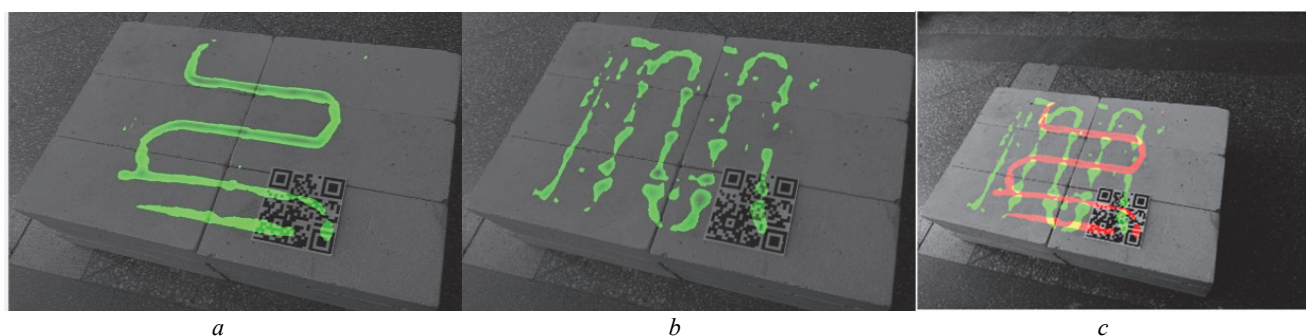


Рис. 6. Радиооптическое изображение слоя коммуникаций: *a* – верхнего слоя; *b* – нижнего слоя; *c* – оба слоя

Fig. 6. Radio-optical image of the communication layer: *a* – the upper layer; *b* – the lower layer; *c* – both layers

В рамках данного многоканального подхода имеется возможность интеграции изображений, полученных с использованием различных физических принципов. Такой подход также позволит осуществить одновременную визуализацию различных томографических слоев.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали, что интеграция технологий дополненной реальности в радиотомографической сканирующей системе может использоваться в области неразрушающего контроля.

Ключевым преимуществом данного подхода является возможность объединения оптических изображений с радиоволновыми данными, что существенно расширяет возможности оператора при исследовании внутренней структуры объектов.

Разработанная методика обеспечивает эффективное обнаружение скрытых объектов за радиопрозрачными препятствиями, включая металлические и диэлектрические материалы. Такое возможно при использовании компактных меток с QR-кодом.

Основные результаты исследования включают усовершенствованный алгоритм визуализации, который учитывает несоосность оптического изображения и плоскости сканирования. Особое внимание было уделено разработке методов компенсации аффинных искажений, что повысило точность совмещения радиографических и оптических данных. Использование QR-маркеров и специализированных алгоритмов обработки обеспечило позиционирование томографических изображений в пространстве.

Представлен алгоритм комбинирования трёхмерного радиоизображения и оптического двумерного изображения. Возможность практического использования метода показана экспериментально.

Список источников

1. Сканер HILTI. URL: https://www.hilti.com/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_CONCRETE_SCANNERS_SENSORS_7127/r6436760 (дата обращения: 20.11.2025).
2. Георадар GPR RV-01. URL: <https://synecta.tech/projects/georadar> (дата обращения: 20.11.2025).
3. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. Томск : Изд-во НТЛ, 2014. 280 с.
4. Khmelev V.L., Gromov M.L. Visualization system for a radio images // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1843. P. 012025 (1-5).
5. Skurowski P., Nurzynska K., Pawlyta M., Cyran K.A. Performance of QR Code Detectors near Nyquist Limits // Sensors. 2022. Vol. 22 (19). Art. no. 7230. P. 1–15. doi: 10.3390/s22197230

References

1. Scanner HILTI. URL: https://www.hilti.com/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_CONCRETE_SCANNERS_SENSORS_7127/r6436760 (Accessed: 20.11.2025).
2. Georadar GPR RV-01 URL: <https://synecta.tech/projects/georadar> (Accessed: 20.11.2025)
3. Yakubov, V.P., Shipilov, S.E., Sukhanov, D.Ya. & Klokov, A.V. (2014) Radiovolnovaya tomografiya: dostizheniya i perspektivy [Radio wave tomography: achievements and prospects]. Tomsk : NTL Publishing House. 280 p.
4. Khmelev, V.L., & Gromov, M.L. (2021) Visualization system for a radio images. *Journal of Physics: Conference Series*. 1843. pp. 012025 (1-5).
5. Skurowski, P., Nurzynska, K., Pawlyta, M. & Cyran, K.A. (2022) Performance of QR Code Detectors near Nyquist Limits. *Sensors*. 22 (19). Art. no. 7230. pp. 1–15. doi: 10.3390/s22197230

Информация об авторах:

Хмелёв Виталий Леонидович – младший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: xmejleb@mail.ru

Еремеев Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: aleksandr_ermeev_93@mail.ru

Васин Василий Васильевич – лаборант Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: north_vasya@mail.ru

Ерзакова Надежда Николаевна – младший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yerzakova-nadya@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Khmelev Vitaly L. – Junior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: xmejleb@mail.ru

Eremeev Alexander I. – Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: aleksandr_ermeev_93@mail.ru

Vasin Vasily V. – Laboratory assistant, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: north_vasya@mail.ru

Yerzakova Nadezhda N. – Junior researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yerzakova-nadya@yandex.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 27.11.2025; принята к публикации 02.12.2025

The article was submitted 30.10.2025; approved after reviewing 27.11.2025; accepted for publication 02.12.2025

Научная статья
УДК 004.8
doi: 10.17223/29491665/9/7

Гибридная нейросетевая архитектура веб-приложения для виртуального проектирования интерьера на основе изображения

Артём Альбертович Сахапов¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия,
aa.sakhapov@gmail.com

Аннотация. Цель работы — разработка веб-приложения для трансформации 2D-фотографий в точную 3D-модель интерьера. Используется гибридная нейросетевая архитектура с оригинальным алгоритмом геометрической стабилизации. Точность реконструкции критически важна для корректного планирования и обеспечения безопасности ремонтных работ для последующей эксплуатации помещений. Система, реализованная на базе MVC и асинхронных задач, гарантирует высокую производительность и масштабируемость.

Ключевые слова: виртуальный дизайн интерьера, глубокое обучение, image inpainting, оценка глубины, генеративно-сопоставительные сети, архитектура MVC

Для цитирования: Сахапов А.А. Гибридная нейросетевая архитектура веб-приложения для виртуального проектирования интерьера на основе изображения // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 68–71. doi: 10.17223/29491665/9/7

Original article
doi: 10.17223/29491665/9/7

Hybrid neural network architecture for virtual interior design web-application based on image

Artem A. Sakhapov¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation,
aa.sakhapov@gmail.com

Abstract. The objective of this work is to develop a web application for the transformation of 2D photographs into an accurate 3D model of the interior. A hybrid neural network architecture with an original geometric stabilization algorithm is used. The accuracy of reconstruction is critically important for proper planning and ensuring the safety of repair work for the subsequent operation of the premises. The system is implemented using an MVC architecture with an asynchronous task queue, ensuring high performance and scalability.

Keywords: virtual interior design, deep learning, image inpainting, depth estimation, generative adversarial networks, MVC architecture

For citation: Sakhapov, A.A. (2025) Hybrid neural network architecture for virtual interior design web-application based on image. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 68–71. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/7

Преодоление ограничений 2D-визуализации

Необходимость высокореалистичной и легкодоступной визуализации интерьеров до начала ремонтных работ является ключевым требованием современного рынка. Существующие решения требуют либо трудоемкого ручного 3D-моделирования, либо использования специализированного оборудования дополненной реальности (AR), что ограничивает их массовое применение.

Объектом исследования является разработка программно-аппаратного комплекса, способного дедуктивно восстанавливать трехмерные характеристики сцены по единственному 2D-снимку.

Цель работы состоит в создании масштабируемого веб-приложения, которое автоматизирует этот процесс, обеспечивая пользователю функционал для:

1) преобразования 2D-фотографии в интерактивное облако точек (3D-модель);

- 2) реалистичного удаления существующих объектов интерьера;
- 3) корректного позиционирования новых 3D-моделей мебели в реконструированном пространстве.

Анализ аналогов и обоснование преимуществ

Анализ рынка показал, что существующие решения обладают ограниченной, фрагментарной функциональностью. Они разделяются на три основные категории: inpainting-инструменты для удаления объектов в 2D, профессиональные 3D-планировщики, требующие ручного моделирования, и AR-приложения для наложения объектов в реальном времени. Предлагаемая гибридная архитектура преодолевает эти ограничения, сочетая сильные стороны всех подходов.

Ключевые преимущества решения:

1. Низкий порог входа и автоматизация: в отличие от 3D-планировщиков, требующих от пользователя экспертных навыков и многочасового ручного 3D-моделирования, решение требует только 2D-фотографию в качестве входных данных, что дает нам адаптивность и независимость от типа комнаты. Весь процесс 3D-реконструкции и семантической обработки выполняется автоматически нейросетевым комплексом.

2. Интегрированное удаление объектов: типичные инструменты могут реалистично удалять объекты в 2D, но не способны восстановить геометрическую информацию, необходимую для 3D-реконструкции. Наше решение использует высокоточный CGAN [1] для реалистичной закраски [2], а затем применяет алгоритм геометрической стабилизации для гарантии того, что восстановленная область (например, часть пола под удаленным диваном) идеально соответствует геометрии реконструированного 3D-пространства.

3. Высокая и гарантированная точность геометрии: AR-приложения для наложения 3D-объектов в реальном времени часто страдают от ошибок трекинга, приводящих к неточной ориентации объектов. Наша система, напротив, создает стабильную 3D-модель и использует уравнение плоскости для коррекции пола и стен. Это гарантированно обеспечивает правильное и устойчивое позиционирование новых 3D-объектов в пространстве, что является критическим преимуществом для точного виртуального дизайна.

Таким образом, предлагаемое гибридное решение является уникальным, предоставляя полный цикл виртуального дизайна – от 2D-входа до геометрически стабилизированного 3D-выхода – с минимальными требованиями к пользователю и максимальной технической точностью.

Комплексная методология глубокого обучения

Основная сложность задачи заключается в извлечении трехмерной геометрии и контекстуальных данных из двумерной проекции, а также в реалистичном воссоздании удаленных участков изображения. Для этого была разработана система, объединяющая три специализированные нейросетевые модели.

Оценка глубины и реконструкция плоскостей. Этот модуль является краеугольным камнем системы, преобразуя входное изображение I в карту глубины D и карту сегментации плоскостей P [3].

Архитектура и оптимизация FPN. Используемая архитектура основана на Feature Pyramid Network (FPN) [4], позволяющей извлекать семантические признаки на разных масштабах. Это критически важно для точности, поскольку крупномасштабные объекты (стены, пол) и мелкомасштабные детали требуют разной глубины обработки:

- одновременное предсказание (multi-task learning): сеть оптимизирована для одновременного выполнения двух задач: регрессии глубины и классификации плоскостей. Предположение о манхэттенской геометрии используется для наложения дополнительных геометрических ограничений на процесс обучения;

- функция потерь: обучение сети ведется с применением guidance loss, которая комбинирует L1-норму для пиксельной ошибки глубины и потерю согласованности (consistency loss) для обеспечения того, чтобы точки, принадлежащие одной предсказанной плоскости, имели согласованные значения глубины.

Реалистичное восстановление изображений (image inpainting). Для удаления объектов и изменения текстур применяется техника inpainting, реализованная на базе условных генеративно-сопоставительных сетей (conditional GANs).

Модификация StyleGAN2 для inpainting. В качестве основы выбран фреймворк StyleGAN2 [5] благодаря его способности генерировать высококачественные изображения. Модификация заключается в адаптации его для работы в качестве условной GAN (CGAN), где генерация обусловлена не только скрытым вектором z , но и входным изображением I с заданной маской M :

$$G : (I \odot (1 - M), M) \rightarrow I_{\text{filled}}. \quad (1)$$

Генератор G обучается воссоздавать содержимое области M . Изменяется механизм модуляции-демодуляции (mod-demod) для внедрения информации о внешнем контексте изображения.

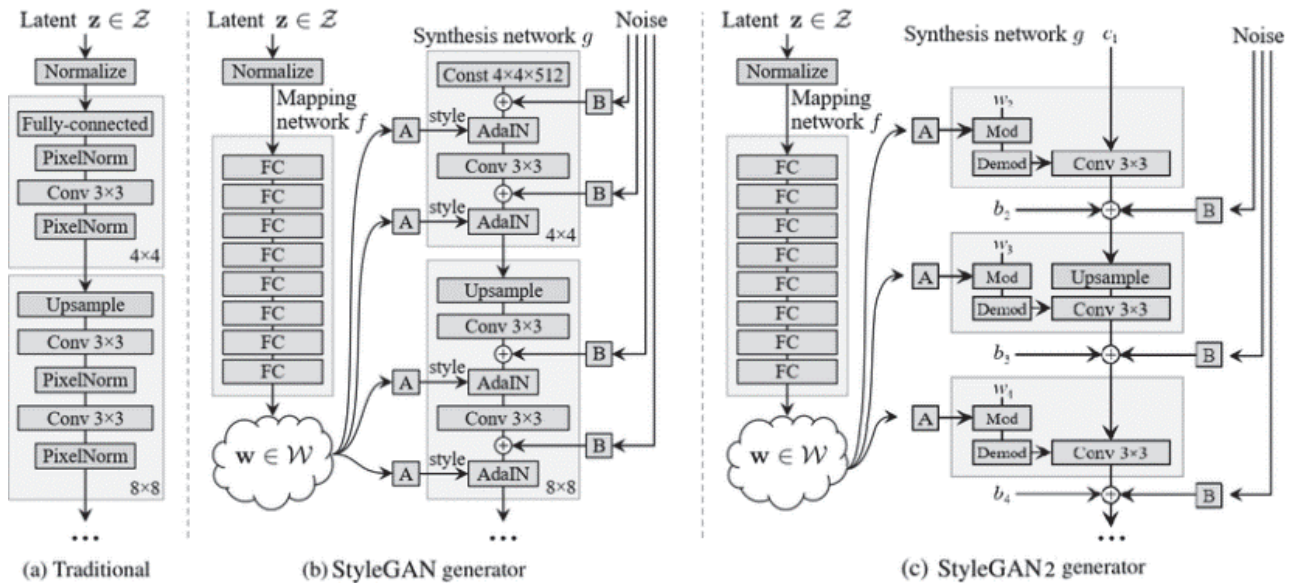


Рис. 1. Оригинальная архитектура (a); архитектура StyleGAN (b); архитектура StyleGAN2 (c)

Fig. 1. Original architecture (a); StyleGAN architecture (b); StyleGAN2 architecture (c)

Система потерь. Эффективность inpainting обеспечивается гибридной функцией потерь, которая включает: адверсариальную потерю (L_{GAN}), реконструктивную потерю (L_{rec}) и контекстуальную потерю (perceptual loss).

Семантическая сегментация объектов. Для точного и автоматизированного выделения объектов интерьера (мебель, пол, стены) применяется сеть HRNetV2 (High-Resolution Network V2). Эта архитектура поддерживает высокое разрешение на протяжении всего процесса обработки, что критически важно для точного создания масок [6].

Геометрическая стабилизация и постобработка

Ключевой технический вызов – это неточность в восстановлении больших плоских поверхностей (пол, потолок, стены) [7].

Алгоритм коррекции плоскостей. Для гарантированной стабилизации геометрии применяется алгоритм, основанный на анализе облака точек $P = (X, Y, Z)$ и данных сегментации S :

1. Выделение целевых точек: с помощью маски S выделяется подмножество точек $P_{plane} \subset P$, принадлежащих определенной плоскости.

2. Оценка параметров плоскости: используется метод наименьших квадратов (least squares) или RANSAC для определения параметров $w = (a, b, c, d)$ канонического уравнения плоскости $ax + by + cz + d = 0$.

3. Коррекция координат: координата глубины z_i каждой точки пересчитывается в \tilde{z}_i , обеспечивая, чтобы все точки лежали строго на плоскости:

$$\tilde{z}_i = -\frac{ax_i + by_i + d}{c}. \quad (2)$$

4. Наложение ограничений: для сохранения естественного сопряжения между плоскостями вводится граничное ограничение. Точки, находящиеся в пределах δ пикселей от границы сегмента, исключаются из процедуры аппроксимации или их коррекция ослабляется.

Архитектура системы и оптимизация производительности

Архитектура MVC и интеграция. Система использует паттерн model-view-controller (MVC), реализованный на фреймворке Django:

– модель: включает в себя нейросетевые оболочки (NN Wrappers): InpaintingWrapper, DepthEstimationWrapper, SegmentationWrapper;

– визуализация (view): клиентская сторона использует Three.js для рендеринга облака точек, манипуляций с 3D-объектами и наложения 2D-текстур на реконструированную геометрию.

Механизм асинхронной очереди задач (task queue). Из-за высокой вычислительной сложности нейросетевых операций используется архитектура асинхронной очереди задач (task queue);

– стек используется Celery в качестве системы управления очередью задач и Redis в качестве брокера сообщений;

– оптимизация инференса: все нейросетевые модели конвертированы и оптимизированы с использованием TensorRT, что обеспечивает минимальное

время отклика (низкую задержку) за счет оптимизации графа вычислений.

Заключение

Разработанное веб-приложение представляет собой передовую платформу для виртуального проектирования интерьеров, интегрирующую самые современные достижения в области компьютерного зрения и глубокого обучения. Ключевой вклад работы заключается в успешной реализации и оптимизации трех сложных

нейросетевых моделей для создания реалистичной 3D-сцены по изображению, а также в разработке оригинального геометрического алгоритма для стабилизации реконструированной сцены. Достигнутая высокая геометрическая точность и надежность 3D-модели способствуют обеспечению безопасности ремонтных работ, позволяя безошибочно рассчитывать материалы и спланировать этапы, что снизит итоговые расходы. Архитектура, основанная на асинхронной обработке, гарантирует масштабируемость и высокое качество пользовательского опыта.

Список источников

1. Radford A., Metz L., Chen S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks // International Conference on Learning Representations (ICLR 2016) (May 2–4, 2016 San Juan, Puerto Rico). 2016. P. 1–16. doi: 10.48550/arXiv.1511.06434
2. Iizuka S., Simo-Serra E., Ishikawa H. Globally and locally consistent image completion // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017). 2017. Art. num. 107. doi: 10.1145/3072959.3073659
3. Xu Y., Peng C., Li M., Li Y., Du S. Pyramid feature attention Network for monocular depth prediction // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Mar 3 2024, USA). 2024. P. 1–6. doi: 10.48550/arXiv.2403.01440
4. Lin T.Y., Dollar P., Girshick R. Feature pyramid networks for object detection // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017) (July 2021, Honolulu, HI, USA). P. 2117–2125. doi: 10.1109/CVPR.2017.106
5. Karras T., Laine S., Aittala M. Analyzing and improving the image quality of StyleGAN // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020) (13–19 June 2020, Seattle, WA, USA). 2020. P. 8110–8119. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00813
6. Xu Z., Zhang W., Zhang T., Li J. HRCNet: high-resolution context extraction Network for semantic segmentation of remote sensing images // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, № 1. P. 71. doi: 10.3390/rs13010071
7. Wang S., Chen K., Wang W. Deep learning for 3D point cloud: A survey // Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (IEEE TPAMI) (29 June 2020). 2020. Vol. 43, № 12. P. 4338–4364. doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434

References

1. Radford, A., Metz, L. & Chen, S. (2016) Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. International Conference on Learning Representations (ICLR 2016) (May 2–4, 2016 San Juan, Puerto Rico). pp. 1–16. doi: 10.48550/arXiv.1511.06434
2. Iizuka, S., Simo-Serra, E. & Ishikawa, H. (2017) Globally and locally consistent image completion. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017). Art. num. 107. doi: 10.1145/3072959.3073659
3. Xu, Y., Peng, C., Li, M., Li, Y. & Du, S. (2024) Pyramid Feature Attention Network for Monocular Depth Prediction. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Mar 3 2024, USA). pp. 1–6. doi: 10.48550/arXiv.2403.01440
4. Lin, T.Y., Dollar, P. & Girshick, R. (2017) Feature pyramid networks for object detection. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017) (July 2021, Honolulu, HI, USA). pp. 2117–2125. doi: 10.1109/CVPR.2017.106
5. Karras, T., Laine, S. & Aittala, M. (2020) Analyzing and improving the image quality of StyleGAN. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020) (13–19 June 2020, Seattle, WA, USA). pp. 8110–8119. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00813
6. Xu, Z., Zhang, W., Zhang, T. & Li, J. (2021) HRCNet: High-Resolution Context Extraction Network for Semantic Segmentation of Remote Sensing Images. Remote Sensing. 13 (1). pp. 71. doi: 10.3390/rs13010071
7. Wang, S., Chen, K. & Wang, W. (2020) Deep learning for 3D point cloud: a survey. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (IEEE TPAMI). 43 (12). pp. 4338–4364. doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434

Информация об авторе:

Сахапов Артём Альбертович – студент Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: aa.sakhapov@gmail.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Sakhapov Artem A. – student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: aa.sakhapov@gmail.com

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 27.11.2025; принята к публикации 02.12.2025

The article was submitted 30.10.2025; approved after reviewing 27.11.2025; accepted for publication 02.12.2025

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2025. № 9

Редактор К.Г. Шилько
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Редактор-переводчик А.П. Данилова

Подписано к печати 08.12.2025 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 9; усл. печ. л. 8,3.
Тираж 500 экз. Заказ № 6604. Цена свободная.

Дата выхода в свет 19.12.2025 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru