

ТОМ 10, №2, 2026

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная  
безопасность /  
Technosphere Safety

Машиностроение /  
Machine Building

Химические технологии,  
науки о материалах,  
металлургия / Chemical  
Technologies, Materials  
Sciences, Metallurgy



[www.bps-journal.ru](http://www.bps-journal.ru)  
DOI 10.23947/2541-9129



# Безопасность техногенных и природных систем

## Safety of Technogenic and Natural Systems

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2541-9129

Издается с 2017 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

**Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:**

- 2.1.16 – Охрана труда в строительстве (технические науки)
- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Металловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

---

<i>Регистрация:</i>	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Индексация и архивация:</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
<i>Сайт:</i>	<a href="https://bps-journal.ru">https://bps-journal.ru</a>
<i>Адрес редакции:</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail:</i>	<a href="mailto:vestnik@donstu.ru">vestnik@donstu.ru</a>
<i>Телефон:</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №2, 2026 в свет:</i>	30.05.2026





# Safety of Technogenic and Natural Systems

## Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnnykh Sistem

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

eISSN 2541-9129

Published Since 2017

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2541-9129

**Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation**

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

**The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.**

**The Journal Publishes Articles in the Following Fields of Science:**

- Labor protection in construction (Engineering Sciences)
- Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
- Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
- Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
- Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
- Materials Science (Engineering Sciences)
- Fire Safety (Engineering Sciences)
- Environmental Safety (Engineering Sciences)
- Occupational Safety (Engineering Sciences)

---

*Registration:* Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated July, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

*Indexing and Archiving:* RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

*Website:* <https://bps-journal.ru>

*Address of the Editorial Office:* 1, Gagarin Sq. Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

*E-mail:* [vestnik@donstu.ru](mailto:vestnik@donstu.ru)

*Telephone:* +7 (863) 2–738–372

*Date of Publication No.2,2026:* 30.05.2026



## Редакционная коллегия

### Главный редактор

**Месхи Бесарион Чохоевич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

### Заместители главного редактора

**Короткий Анатолий Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Азаров Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

### Выпускающий редактор

**Комахидзе Манана Гивиевна**, кандидат химических наук, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

### Ответственные секретари

**Хазанович Григорий Шнеерович**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Шевченко Надежда Анатольевна**, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Абдрахманов Наиль Хадитович**, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

**Агеева Екатерина Владимировна**, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

**Агеев Евгений Викторович**, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

**Амосов Александр Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

**Баурова Наталья Ивановна**, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация)

**Беспалов Вадим Игоревич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Булыгин Юрий Игоревич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Воронова Элеонора Юрьевна**, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

**Гапонов Владимир Лаврентьевич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Гурова Оксана Сергеевна**, доктор технических наук, доцент, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Гутаревич Виктор Олегович**, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика)

**Деев Владислав Борисович**, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

**Дорофеев Владимир Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

**Егоров Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

**Еремеева Жанна Владимировна**, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

**Копченко Вячеслав Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

**Лагерева Александр Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

**Лагерева Игорь Александрович**, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

**Манжула Константин Павлович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация)

**Мензелинцева Надежда Васильевна**, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

**Минко Всеволод Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация)

**Москвичев Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация)

**Носенко Алексей Станиславович**, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

**Плешко Михаил Степанович**, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация)

**Пустовойт Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Пушенко Сергей Леонардович**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Порошин Александр Алексеевич**, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация)

**Севастьянов Борис Владимирович**, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

**Тюрин Александр Павлович**, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

**Федок Роман Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

**Хазанович Григорий Шнеерович**, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

**Хафизов Ильдар Фанлиевич**, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

**Хафизов Фаниль Шамильевич**, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

**Чукарин Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

**Besarion Ch. Meskhi**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

### Deputy Chief Editors

**Anatoliy A. Korotkiy**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Valery N. Azarov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

### Executive Editor

**Manana G. Komakhidze**, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

### Executive Secretaries

**Grigoriy Sh. Khazanovich**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Nadezhda A. Shevchenko**, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Aleksandr A. Poroshin**, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation)

**Aleksandr N. Chukarin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Aleksandr P. Amosov**, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

**Aleksandr P. Tyurin**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

**Aleksandr V. Lagerev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Aleksey S. Nosenko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation)

**Boris V. Sevastyanov**, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

**Ekaterina V. Ageeva**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

**Eleonora Yu. Voronova**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation)

**Evgeniy V. Ageev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

**Fanil Sh. Hafizov**, Dr.Sci. (Eng.) Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

**Grigoriy Sh. Khazanovich**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Igor A. Lagerev**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Ildar F. Hafizov**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

**Konstantin P. Manzhula**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Mikhail S. Pleshko**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

**Nadezhda V. Menzelintseva**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

**Nail Kh. Abdrakhmanov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

**Natalya I. Baurova**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation)

**Oksana S. Gurova**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Roman S. Fediuk**, Dr.Sci. (Eng.), professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

**Sergey L. Pushenko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Sergey N. Egorov**, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

**Vadim I. Bepalov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Viktor N. Pustovoit**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Viktor O. Gutarevich**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

**Vladimir L. Gaponov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Vladimir V. Moskvichev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

**Vladimir Yu. Dorofeev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

**Vladislav B. Deev**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

**Vsevolod A. Minko**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation)

**Vyacheslav G. Kopchenkov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

**Yuriy I. Bulygin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Zhanna V. Ereemeva**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

## Содержание

### ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Особенности статистических связей межгодовых изменений пожароопасности по условиям погоды в улусах (районах) Якутии с вариациями показателей горимости ее лесов в предыдущие годы** ..... 79  
*А.В. Холопцев, Р.Г. Шубкин, Ю.Н. Коваль*
- Индивидуальный уровень ответственности и эмоциональности как фактор реализации опасных производственных событий** ..... 95  
*Н.М. Герасименко, Е.В. Глебова, Ю.О. Рогозин*
- Обоснование и выбор оптимальных вариантов функционирования системы обращения твердых коммунальных отходов для целей эффективной инсинерации** ..... 107  
*Алкинани Фатима Дахил Саидхуд*
- Исследование воздействия на здоровье человека и окружающую среду качества воды, поступающей в центральные системы водоснабжения** ..... 119  
*К. Д. Мишина, О. Е. Безбородова, Н. В. Камардина*
- Регенерация фильтровального материала гидродинамического фильтра** ..... 132  
*В.А. Девисилов, Н.П. Фролов*
- Особенности взаимодействия красителя «метиленовый голубой» с сорбционным материалом, полученным на основе отхода регенерации машинных масел** ..... 142  
*Я.А. Мурзаханов, Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова, А.В. Святченко*

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Интеллектуализация фильтров Калмана для повышения автономности и точности навигационных систем беспилотных летательных аппаратов** ..... 152  
*И.В. Контарев, В.В. Белик*
- Интеллектуальная система поддержки принятия решений для комплексной диагностики взаимосвязанных систем автомобиля** ..... 166  
*Р.В. Хван*

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Методика проведения квантово-химических расчетов активных центров молекулярного комплекса «сорбент — загрязнитель» при поиске компонентов фильтров балластных вод** ..... 177  
*А.Н. Цыгута*

## Contents

### TECHNOSPHERE SAFETY

- Statistical Relationships between Year-to-Year Changes in Fire Hazard due to Weather Conditions in the Uluses (Districts) of Yakutia and Variations in Forest Fire Rates in Previous Years** ..... 79  
*Aleksandr V. Kholoptsev, Roman G. Shubkin, Yuliya N. Koval*
- Individual Level of Responsibility and Emotionality as a Factor in the Occurrence of Hazardous Industrial Events** ..... 95  
*Nadezhda M. Gerasimenko, Elena V. Glebova, Yuri O. Rogozin*
- Justification and Selection of Optimal Options for the Operation of Municipal Solid Waste Management System in Order to Ensure Effective Incineration** ..... 107  
*Fatimah Dakhil Saihood Alkinani*
- Investigation of the Impact of Water Quality in Central Water Supply Systems on Human Health and the Environment** ..... 119  
*Kristina D. Mishina, Oksana E. Bezborodova, Natalya V. Kamardina*
- Regeneration of Filter Material of Hydrodynamic Vibration Filter** ..... 132  
*Vladimir A. Devisilov, Nikita P. Frolov*
- Interaction of Methylene Blue with a Sorption Material Obtained from Engine Oil Regeneration Waste** ..... 142  
*Yan A. Murzakhanov, Zhanna A. Sapronova, Svetlana V. Sverguzova, Anastasia V. Svyatchenko*

### MACHINE BUILDING

- Intellectualization of Kalman Filters to Increase the Autonomy and Accuracy of Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicles** ..... 152  
*Igor V. Kontarev, Vladimir V. Belik*
- Intelligent Decision Support System for Comprehensive Diagnostics of Interconnected Vehicle Systems** ..... 162  
*Roman V. Khvan*

### CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Method for Quantum-Chemical Calculations of Active Centers of the “Sorbent — Pollutant” Molecular Complex in the Search for Ballast Water Filter Components** ..... 177  
*Anna N. Tsyguta*

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 502.45

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

### Особенности статистических связей межгодовых изменений пожароопасности по условиям погоды в улусах (районах) Якутии с вариациями показателей горимости ее лесов в предыдущие годы



EDN: WEXLSR

А.В. Холопцев , Р.Г. Шубкин , Ю.Н. Коваль 

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

г. Железногорск, Российская Федерация

✉ [khloptsev@mail.ru](mailto:khloptsev@mail.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Глобальное потепление климата обостряет проблему ландшафтных пожаров вследствие усиления испарения влаги из горючего материала, увеличения повторяемости сухих гроз, расширения пожароопасного сезона и смещения границ ландшафтных зон. Особую угрозу эти процессы представляют для лесных регионов России, прежде всего для Республики Саха (Якутия). В работах отечественных и зарубежных исследователей установлено значимое влияние межгодовых колебаний среднемесячных температур приземного воздуха (СТВ) на вариации пожарных рисков. Авторами ранее доказано существование во многих районах Сибири положительной обратной связи между показателями горимости лесов и температурными аномалиями последующего года. Однако значимость этой связи на уровне отдельных улусов Якутии, территории которых совпадают с зонами ответственности противопожарных подразделений, ранее не оценивалась, что формирует существенный пробел в научном знании. Целью исследования является восполнение данного пробела путем оценки значимости указанной связи для всех улусов республики и проверки ее устойчивости к временным сдвигам анализируемых рядов.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось с использованием данных за 2000–2024 гг. Как источник информации о распределении СТВ на высоте 2 м над изучаемыми территориями, соответствующими узлам сетки 0,25°, использован реанализ ERA5<sup>1</sup>. Как фактический материал о количестве ландшафтных пожаров на территории каждого улуса (района) Якутии и общей площади ее участков, пройденных огнем в тот или иной год из указанного периода, использованы сведения Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Для каждого из 34 улусов (районов) Якутии с учетом информации об СТВ, соответствующей пунктам, для которых в ERA5 представлены такие сведения, вычислены средние СТВ по всей его территории для месяцев с мая по июль. Статистические связи между межгодовыми изменениями средних СТВ за рассматриваемый период и вариациями показателей горимости лесов всей Якутии (опережающими их на один год) исследовались методом корреляционного анализа для различных отрезков времени длительностью 10–20 лет. Перед проведением анализа из сопоставляемых временных рядов удалялись линейные тренды. Значимость корреляционных коэффициентов оценивалась с использованием критерия Стьюдента при уровне достоверности не менее 95 %. Устойчивость выявленных связей проверялась путем изучения их сохранения при временных сдвигах рядов на единицы лет и при изменении длины анализируемых отрезков в пределах 10–20 лет.

**Результаты исследования.** Установлены улусы (районы) Якутии, для которых статистические связи межгодовых изменений средних СТВ для мая — июля с опережающими их по времени на один год вариациями количества ландшафтных пожаров и площади участков всей территории Якутии, пройденных огнем за каждый из 2000–2023 годов, с достоверностью  $\geq 95\%$  признаны значимыми. К ним относятся улусы (районы), расположенные как в северной и западной части территории республики, так и в ее центральной части. Доказана устойчивость выявленных связей к временным сдвигам анализируемых периодов на единицы лет в прошлое и будущее, а также к изменению продолжительности отрезков временных рядов в пределах 10–20 лет. При этом

<sup>1</sup> От англ. Reanalysis.

установлено, что в период 2001–2023 гг. рассматриваемые связи прогрессивно усиливаются: количество улусов и районов, для которых достоверность выводов  $\geq 95\%$ , увеличилось более чем в два раза, а число территорий, где достоверность  $\geq 99\%$ , выросло с нуля до 16. Связи изменений СТВ для выявленных улусов (районов) с вариациями количества пожаров на территории Якутии обладают более высокой достоверностью, чем их связи с вариациями площади участков, пройденных огнем за год.

**Обсуждение.** Полученные результаты подтверждают существование на территории Якутии улусов (районов), для которых влияние на межгодовые изменения СТВ, оказываемое вариациями показателей горимости лесов всей Якутии, опережающими их по времени на 1 год, является значимым. Их новизна состоит в выявлении всех улусов (районов), для которых связи между этими процессами являются значимыми и обладают устойчивостью к временным сдвигам. Выявленная устойчивость обнаруженных связей указывает на фундаментальный характер зависимости: загрязнение снега осевшими на него частицами пожарных аэрозолей снижает альбедо покрытой им подстилающей поверхности, что ускоряет таяние, повышение СТВ и интенсивности испарения, усиливая пожароопасность. За изучаемый период эти связи усилились, что свидетельствует о влиянии потепления климата на активизацию рассматриваемой положительной обратной связи. Поэтому при дальнейшем потеплении климата Якутии они еще более усилятся. Вариации количества ландшафтных пожаров на всей территории Якутии сильнее влияют на изменения СТВ для выявленных улусов (районов), чем вариации площади выгорания. Полученные результаты позволяют использовать показатели горимости лесов всей Якутии предыдущего года как предикторы при долгосрочном прогнозировании СТВ для выявленных ее районов (улусов).

**Заключение.** Выявлены улусы (районы) Якутии, для которых статистические связи между изменениями показателей горимости лесов на всей территории республики и запаздывающими по отношению к ним на год вариациями СТВ в мае — июле являются значимыми. При достоверности такого вывода  $\geq 95\%$  таких улусов (районов) для периода 2015–2024 гг. выявлено 23, а при достоверности  $\geq 99\%$  — 16. Доказана устойчивость этих связей к временным сдвигам и длительности временных рядов. Установлено, что за 2001–2024 гг. выявленные связи существенно усилились, что указывает на активизацию в регионе рассматриваемой положительной обратной связи. Поставленные в работе задачи решены: определены расположения улусов (районов) Якутии, а также месяцы, для которых рассматриваемые связи являются наиболее сильными и устойчивыми. Показано также, что количество пожаров на всей территории Якутии служит более информативным предиктором прогностических моделей изучаемого процесса для ее улусов (районов), чем площадь выгорания. Результаты исследования открывают возможность использования результатов мониторинга показателей горимости лесов Якутии для разработки прогнозов на предстоящий год СТВ на территориях выявленных ее улусов (районов) для месяцев май — июль, на которые приходится пик их горимости. Это имеет практическое значение для оптимизации стратегий противопожарного менеджмента в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** возгорания лесов в Саха (Якутия), температура приземного воздуха, горимость лесов, лесопожарный прогноз, пройденная огнем площадь

**Для цитирования.** Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Коваль Ю.Н. Особенности статистических связей межгодовых изменений пожароопасности по условиям погоды в улусах (районах) Якутии с вариациями показателей горимости ее лесов в предыдущие годы. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(2):79–94. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

*Original Theoretical Research*

## Statistical Relationships between Year-to-Year Changes in Fire Hazard due to Weather Conditions in the Uluses (Districts) of Yakutia and Variations in Forest Fire Rates in Previous Years

Aleksandr V. Kholoptsev  , Roman G. Shubkin , Yuliya N. Koval 

Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

 [kholoptsev@mail.ru](mailto:kholoptsev@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Global climate warming is exacerbating the problem of landscape fires due to increased evaporation of moisture from combustible materials, more frequent dry thunderstorms, extended fire season, and shifting boundaries of landscape zones. These processes pose a particular threat to the forest regions of Russia, especially the Republic of Sakha (Yakutia). Domestic and international researchers have found that year-to-year variations in average monthly surface air temperature (MAT) have a significant impact on variations in fire risks. The authors have previously proved the existence of a positive reverse causality between the indicators of forest fire frequency and temperature anomalies of the following year in many regions of Siberia. However, the significance of this connection at the level of individual

uluses of Yakutia, the territories of which coincide with the areas of responsibility of fire departments, has not previously been assessed. This creates a gap in scientific knowledge. The aim of this research is to fill this gap by assessing the significance of this relationship for all uluses of the republic and checking its resistance to time shifts of the analyzed series.

**Materials and Methods.** The research was conducted using data from 2000–2024. ERA5 reanalysis was used as a source of information on MAT distribution at a height of 2 m above the studied territories, corresponding to the nodes of the 0.25° grid. Information from the Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency was used as factual material on the number of landscape fires in the territory of each ulus (district) of Yakutia and the total area of its sites covered by fire each year during the specified period. For each of the 34 uluses (districts) of Yakutia, we calculated the average MAT for their entire territory for the months from May to July, taking into account MAT information corresponding to points for which such information was provided in ERA5. The statistical relationships between interannual changes in the average MAT for the period under review and variations in forest fires indicators throughout Yakutia (one year ahead) were studied using correlation analysis for various time periods lasting 10–20 years. Linear trends were removed from the time series before performing the analysis. The significance of correlation coefficients was assessed using the Student's criterion with a confidence level of 95% or higher. The stability of these relationships was verified by examining their consistency when the series were shifted by one year and when the analyzed segments were varied between 10 and 20 years in length.

**Results.** The uluses (districts) of Yakutia were identified, where statistical relationships between interannual changes in the average MAT for May–July, with one-year-ahead variations in the number of landscape fires and the area of fire-affected areas of Yakutia from 2000 to 2023, were found to be significant at a confidence level  $\geq 95\%$ . These include uluses (districts) located both in the northern and western parts of the republic's territory, as well as in its central part. The stability of the identified relationships was proved to time shifts of the analyzed periods by units of years into the past and future, as well as to changes in the duration of time series segments within 10–20 years. It was also established that during the period from 2001 to 2023, the relationships under consideration gradually strengthened: the number of uluses and districts with reliability of conclusions  $\geq 95\%$  increased more than twice, and the number of territories with reliability  $\geq 99\%$  rose from zero to 16. The relationship between changes in MAT for the identified uluses (districts) and variations in the number of fires in the territory of Yakutia were more reliable than the relationships with variations in the area of its parts affected by fire.

**Discussion.** The results confirmed the existence of uluses (districts) on the territory of Yakutia, for which the influence on the interannual changes in MAT exerted by variations in the indicators of forest fires throughout Yakutia, which were 1 year ahead of them in time, was significant. The novelty consisted in identifying all uluses (districts) for which the connections between these processes were significant and resistant to time shifts. The revealed stability of the discovered relationships indicated the fundamental nature of the dependence: contamination of snow by particles of fire aerosols deposited on it reduced the albedo of the underlying surface covered with it, which accelerated melting, increased the temperature and evaporation rate, increasing fire risk. During the period under study, these relationships strengthened, which indicated the influence of climate warming on the activation of the positive reverse causality under consideration. Therefore, with further warming of the climate of Yakutia, they would increase even more. Variations in the number of landscape fires throughout Yakutia had a stronger effect on MAT changes for the identified uluses (districts) than variations in the burned area. The results obtained made it possible to use the indicators of forest fires throughout Yakutia of the previous year as predictors for long-term MAT forecasts for its identified areas (uluses).

**Conclusion.** Uluses (districts) in Yakutia have been identified, for which the statistical relationship between changes in forest burning rates throughout the republic and annual MAT variations in May — July are significant. With a reliability of  $\geq 95\%$  for such uluses (districts) for the period from 2015 to 2024, 23 were identified, and with a reliability of  $\geq 99\%$ , 16 were identified. The stability of these relationships to time shifts and the duration of time series have been proved. It is established that for 2001–2024, the identified relationships have significantly strengthened, which indicates the activation of the positive reverse causality in question in the region. The tasks set in the work have been solved: the locations of the uluses (districts) of Yakutia have been determined, as well as the months for which the considered relationships are the strongest and most stable. It is also shown that the number of fires on the entire territory of Yakutia serves as a more informative predictor of the prognostic models of the studied process for its uluses (districts) than the burned area. The results of the study suggest that it is possible to use the results of monitoring forest fires in Yakutia to create forecasts for the upcoming year for the identified uluses (districts). This is particularly important for optimizing fire management strategies in a changing climate, as the months of May — July account for the peak of forest fires.

**Keywords:** forest fires in Sakha (Yakutia), surface air temperature, forest flammability, forest fire forecast, area burned

**For Citation.** Kholoptsev AV, Shubkin RG, Koval YuN. Statistical Relationships between Year-to-Year Changes in Fire Hazard due to Weather Conditions in the Uluses (Districts) of Yakutia and Variations in Forest Fire Rates in Previous Years. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):79–94. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

**Введение.** Долгосрочные прогнозы опасных последствий потепления климата необходимы для повышения эффективности управления деятельностью подразделений и служб, занимающихся их профилактикой и ликвидацией. Поэтому совершенствование методик их долгосрочного прогнозирования для различных месяцев предстоящего года — актуальная проблема безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Согласно существующим представлениям о последствиях потепления климата Сибири [1], многие такие процессы способствуют увеличению количества возникающих здесь ландшафтных пожаров (КЛП) и суммарных площадей участков ее территории, пройденных огнем (ППО). Примерами таких процессов могут служить: нарушение гидрологического цикла, вызванное повышением интенсивности испарения влаги из горючего материала, расширение временных рамок пожароопасного сезона [2]. Последствием потепления климата является также смещение ландшафтных границ в более высокие широты [3], а также внедрение в экосистемы инвазивных видов вредителей, ускоряющих образование горючего материала [4]. Следовательно, потепление климата вызывает усиление статистических связей между изменениями среднемесячных температур приземного воздуха над изучаемой территорией (СТВ) и вариациями упомянутых показателей лесной горимости. При этом усиливаются не только прямые связи (повышение СТВ на территориях, покрытых лесами — причина увеличения их горимости), но и обратные. Как показано в [5], возрастание по какой-либо причине горимости лесов Якутии в предыдущем пожароопасном сезоне приводит к увеличению количества пирогенных веществ, поступивших за это время в атмосферу. Ветры южных румбов, преобладающие в осенне-зимние месяцы, распределяют эти вещества по территории Сибири. Пирогенные вещества с осени оседают на снежный покров, усиливают его неоднородность и, соответственно, снижают альбедо [6]. Как следствие, возможно более интенсивное весеннее таяние снега. Горючий материал на таких территориях высыхает быстрее, что повышает как СТВ [7], так и горимость лесов в мае — июне [8]. Нетрудно видеть причинно-следственную связь. Чем интенсивнее были пожары в предыдущем году, тем больше образовалось продуктов горения. Там, где они выпадали, весной быстрее повышалась СТВ. Это положительная обратная связь. Для некоторых локаций она может быть значимой, устойчивой, и это опасно в связи с увеличением не только КЛП и ППО, но и активизацией других последствий потепления местного климата.

В [5] установлено, что такая связь наиболее значима для Якутии и в меньшей степени для Красноярского края, однако недостаточно изучен вопрос о том, на территориях каких районов или улусов этих регионов она обладает этим свойством, а также устойчивостью. Указанный пробел в знаниях существенен, поскольку зоны ответственности многих противопожарных подразделений Якутии совпадают с такими территориями, а долгосрочные прогнозы СТВ для них, предлагаемые Гидрометцентром России, характеризуются (по оценкам их разработчиков) оправдываемостью 0,7–0,8 [9].

При разработке таких прогнозов учитываются многочисленные факторы изучаемых процессов, способные в тех или иных условиях являться значимыми и устойчивыми. Поэтому расширение перечня таких факторов и выявление упомянутых условий является одним из перспективных направлений повышения качества таких прогнозов [10].

Вместе с тем для такого фактора межгодовых вариаций СТВ, как изменение показателей горимости лесов Якутии, упомянутые условия не выявлены, что ограничивает возможности его учета при прогнозировании. Наибольший интерес их определение представляет для регионов, обладающих значительными лесными ресурсами, населению, экосистемам и экономике которых ландшафтные пожары ежегодно причиняют существенный ущерб [11].

В России крупнейшим из таких регионов является республика Саха (Якутия) [12], а его лесным ресурсам в XXI веке причиняется все больший ущерб, что подтверждают соответствующие зависимости КЛП и ППО от времени (рис. 1).

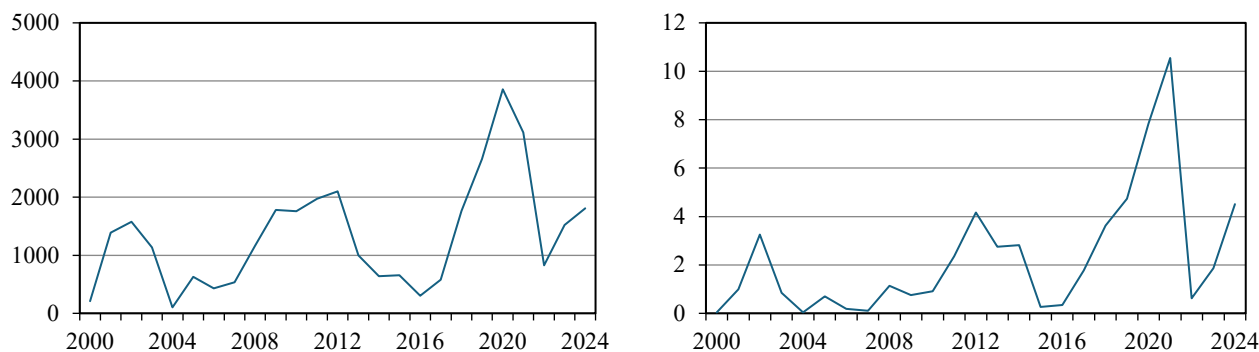


Рис. 1. Зависимости от времени показателей горимости ландшафтов Якутии, построенные авторами по данным дистанционного мониторинга<sup>2</sup>: а — КЛП; б — ППО

<sup>2</sup> Федеральное агентство лесного хозяйства. Информационная система дистанционного мониторинга. Блок мониторинга пожарной опасности. URL: [https://pushkino.aviales.ru/main\\_pages/index.shtml](https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml) (дата обращения: 06.04.2026).

Как видно из рис. 1, изменения КЛП и ППО для Якутии происходят квазициклически, с периодом, близким к 11 годам. При этом в период 2000–2023 гг. в этих изменениях проявляются тенденции их активизации. Максимальные значения КЛП и ППО в XXI веке приходились на 2020 год и превышали минимальные значения этого показателя более чем в 10 и 100 раз [5]. Прогнозы этих показателей либо СТВ на предстоящий год, обладающие удовлетворительным качеством, необходимы для управления деятельностью противопожарных подразделений и ее планирования.

Следовательно, совершенствование методики их разработки представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Согласно существующим представлениям о перспективных направлениях развития таких методик [13], одной из них является выявление факторов межгодовых изменений СТВ, способных оказывать значимое воздействие на колебания, запаздывающие на время, равное требуемой заблаговременности прогноза. Связи таких факторов с прогнозируемым процессом должны обладать устойчивостью к временным сдвигам сопоставляемых фрагментов их временных рядов [14]. Они должны обладать некоторой устойчивостью и к изменениям длины этих фрагментов<sup>3</sup>. Подобная устойчивость, имевшая место в прошлом, позволяет принять допущение о том, что выявленные связи останутся значимыми и в будущем [15].

В Якутии зоны ответственности большинства противопожарных подразделений практически совпадают с территориями ее улусов (районов). Поэтому для каждого из них необходимы прогнозы СТВ на предстоящий год, разработанные не для всей Якутии, а для таких территорий.

Вместе с тем улусы Якутии, для которых связи межгодовых изменений СТВ текущего года с вариациями показателей лесной горимости в предыдущем году являются значимыми и устойчивыми, ранее установлены не были, что препятствует учету упомянутых зависимостей при разработке реально востребованных пожарными прогнозов.

Изложенное позволяет выдвинуть гипотезу о том, что на территории Якутии существуют улусы (районы), для которых связи межгодовых изменений СТВ текущего года с вариациями показателей лесной горимости предыдущего года являются значимыми и обладают устойчивостью.

Несмотря на причинный характер изучаемой связи, из ее значимости для всей Якутии отнюдь не следует значимость и устойчивость также для любого отдельно взятого улуса. Поэтому выдвинутая гипотеза отнюдь не тривиальна.

Подтверждение справедливости гипотезы для каких-либо улусов Якутии позволило бы учесть рассматриваемые зависимости при составлении для них прогнозов СТВ и, следовательно, пожароопасности на предстоящий год. Тем не менее, проверка выдвинутой гипотезы ранее не проводилась.

Целью данной работы является выявление районов и улусов Якутии, для которых в отдельные месяцы гипотеза справедлива, а также оценка устойчивости изучаемых связей к временным сдвигам.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– выявление улусов (районов) Якутии, для которых в отдельные месяцы значимым фактором межгодовых изменений СТВ над их территориями являются вариации КЛП и ППО на всей территории республики в предшествующие годы;

– оценка устойчивости выявленных значимых связей к сдвигам исследуемых отрезков рядов СТВ и их предикторов по времени, а также к изменениям продолжительности этих отрезков.

**Материалы и методы.** При решении первой задачи принималось во внимание, что Республика Саха (Якутия) представляет собой наибольший по площади (3 083 523 км<sup>2</sup>) регион России, расположенный на севере Сибири. Климат Якутии — резко континентальный. Пожароопасный сезон охватывает период с мая по сентябрь. Пик горимости лесов на большей части территории республики приходится на июнь, тогда как в улусах, расположенных в северной ее части, — на июль.

В состав Якутии входит город республиканского значения (Якутск) и 34 улуса (района). На рис. 2 красным цветом выделен Якутск. Обозначены районы: 1 — Абыйский; 2 — Алданский; 3 — Аллаиховский; 4 — Амгинский; 6 — Булунский; 7 — Верхневиллоийский; 8 — Верхнеколымский; 9 — Верхоянский; 10 — Вилюйский; 14 — Ленский; 16 — Мирнинский; 17 — Момский; 19 — Нерюнгринский; 20 — Нижнеколымский; 21 — Нюрбинский; 23 — Оленёкский эвенкийский национальный; 24 — Олекминский; 26 — Сунтарский; 28 — Томпонский. Обозначены улусы: 5 — Анабарский национальный (Долгано-Эвенкийский); 11 — Горный; 12 — Жиганский; 13 — Кобяйский; 15 — Мегино-Кангаласский; 18 — Намский; 22 — Оймяконский; 25 — Среднеколымский; 27 — Таттинский; 29 — Усть-Алданский; 30 — Усть-Майский; 31 — Усть-Янский; 32 — Хангаласский; 33 — Чурапчинский; 34 — Эвено-Бытантайский национальный. Такие же числовые обозначения районов и улусов Якутии использованы в таблицах с результатами исследований.

<sup>3</sup> Технологии динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы. URL: <https://old.meteoinfo.ru/training/206-2011-02-20-07-18-08> (дата обращения: 20.02.2011).

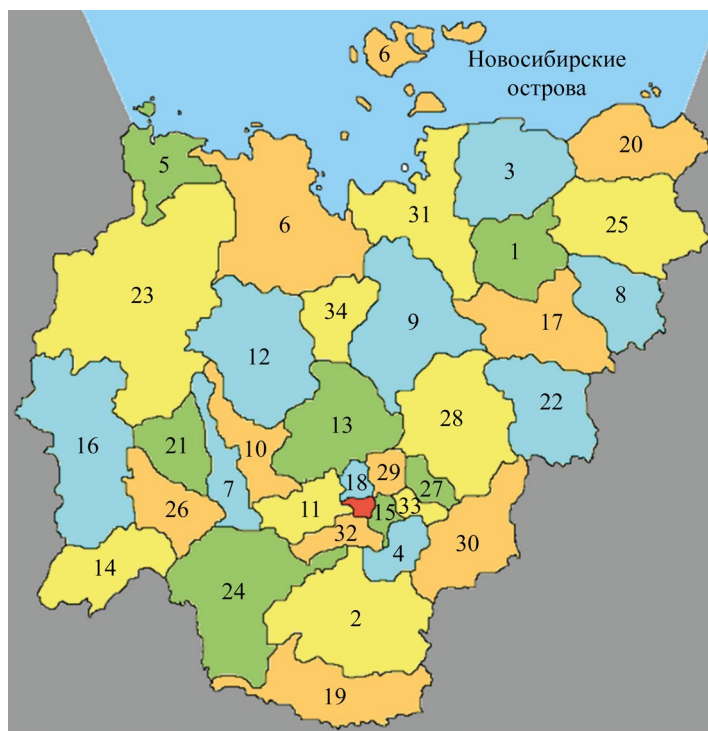


Рис. 2. Расположение улусов (районов) республики Саха (Якутия) [16]

Как фактический материал об изменениях СТВ в различных пунктах территории каждого улуса Якутии использована информация реанализа ERA5 об изменениях этого показателя на высоте 2 м над земной поверхностью [17]. Использованная информация описывает изменения СТВ для мая – июля с 2001 г. по 2024 г.<sup>4</sup>

Для каждого из 34 улусов (районов) Якутии с учетом информации об СТВ, соответствующей его пунктам, для которых в ERA5 представлены такие сведения, вычислены средние СТВ по всей его территории для месяцев с мая по июль.

Для выборочного тестирования результатов реанализа использованы сведения об изменениях в период 2010–2023 гг. СТВ в пунктах Якутск, Сангар, Алдан, Амга, Оймякон, Олѣкминск, Ленск, Вилуйск, Верхоянск и Черский<sup>5</sup>.

Установлено, что на любых отрезках времени продолжительностью 10–20 лет из периода 2000–2024 гг. значения коэффициента корреляции временных рядов, образованных из стационарных данных и рядов, сформированных из результатов ERA5, составляют не менее 0,99. Таким образом, тестирование подтвердило пригодность информации реанализа ERA5 для решения поставленных задач.

Как источник информации об изменениях КЛП и ППО в 2000–2023 гг. на территории Якутии, а также каждого ее улуса (района) использована Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства Лесного хозяйства.

Связи межгодовых изменений в 2001–2024 гг. СТВ над территорией того или иного улуса (района) Якутии для некоторого месяца, а также опережающих их на 1 год вариаций КЛП и ППО для всей ее территории изучались для различных отрезков времени длиной от 10 до 20 лет. При этом использован метод корреляционного анализа.

Перед осуществлением анализа в сопоставляемых рядах скомпенсированы линейные тренды. Для этого вычислялось откорректированное значение изучаемого показателя  $X(k)$ :

$$X(k) = X_0(k) - L \times (k - k_0).$$

Здесь  $k$  — год, соответствующий рассматриваемому члену изучаемого отрезка временного ряда процесса или его фактора, который может принимать значения от 2000 до 2024;  $k_0$  — год, соответствующий первому члену рассматриваемого отрезка изучаемого временного ряда;  $X_0(k)$  — член исходного временного ряда, соответствующий году  $k$ ;  $L$  — значение углового коэффициента линейного тренда, вычисленное методом наименьших квадратов по изучаемому отрезку рассматриваемого временного ряда.

Решение о значимости рассматриваемых связей принималось, если достоверность такого статистического вывода превышала 0,95. Как характеристика связи рассматривалось значение коэффициента корреляции.

<sup>4</sup> ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> (дата обращения: 06.04.2026).

<sup>5</sup> Global climate data tutiempo net climate data. URL: <https://www.google.com/search?q=tutiempo+net+climate+data&rlz> (дата обращения: 06.04.2026).

Принято допущение о том, что отклонения показателей изучаемых процессов от соответствующих трендов являются нормальными случайными процессами. Его справедливость подтверждалась с применением критерия Пирсона. Поэтому для оценки значимости вычисленного значения коэффициента корреляции применен критерий Стьюдента. Пороговый уровень этого коэффициента, при превышении которого принималось решение о значимости изучаемой связи, определялся по таблицам распределения Стьюдента, учитывая количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов. Последнее определялось по их автокорреляционным функциям. Также по таблицам распределения Стьюдента определялись значения того же коэффициента, при превышении которых достоверность выводов о значимости связи составляла 0,9 и 0,99. Установлено, что количество степеней свободы изучаемых рядов равно их длине. Поэтому при длине 10 лет достоверность статистического вывода о значимости изучаемых связей составляет не менее 90 %, если соответствующее значение коэффициента корреляции превышает 0,52. Достоверность такого вывода не менее 95 %, если значение коэффициента корреляции рассматриваемых процессов превышает 0,635, а при его значении 0,745 достоверность этого вывода не ниже 99 %.

При длине рядов 20 лет достоверности вывода о значимости изучаемых связей 90 % соответствует пороговый уровень коэффициента корреляции 0,36, а достоверностям того же вывода 95 % и 99 % отвечают пороговые уровни этого коэффициента 0,45 и 0,58 соответственно.

При решении второй задачи оценивалась устойчивость выявленных значимых связей межгодовых изменений СТВ с вариациями КЛП и ППО к сдвигам по времени рассматриваемых отрезков изучаемых временных рядов, а также к изменениям их длины. Рассматривались сдвиги по времени на единицы лет, как в прошлое, так и в будущее. Предполагалось, что значения длины изучаемых временных рядов могут лежать в пределах от 10 до 20 лет.

Для оценки устойчивости изучаемых связей сопоставлялись значения коэффициента корреляции временных рядов СТВ, с рядами КЛП или ППО для каждого улуса (района) Якутии, соответствующие изучаемым отрезкам времени, которые отличались годом своего начала, а также длиной. При этом учитывались значения пороговых уровней коэффициента корреляции, соответствующие рассматриваемой достоверности выводов об их значимости, а также количеству степеней свободы изучаемых рядов.

Связи между изучаемыми процессами признавались устойчивыми к рассматриваемым временным сдвигам, если для всех изучаемых отрезков они являлись значимыми с достоверностью не ниже 95 %.

Эти связи рассматривались как устойчивые к вариациям продолжительности изучаемых отрезков, если при любом ее значении в пределах от 10 до 20 лет они являлись значимыми с достоверностью не ниже 95 %.

**Результаты исследования.** При решении первой задачи установлено, что статистические связи межгодовых изменений средних СТВ над территориями некоторых улусов Якутии на отрезках времени 10–20 лет с вариациями показателей горимости ее лесов, опережающими их по времени на 1 год, в период 2000–2023 гг., были значимы лишь для месяцев май — июль.

Как пример, в таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями ППО в 2011–2020 гг. Здесь и далее желтым цветом выделены значения этих коэффициентов, для которых достоверность выводов об их значимости превышает 90 %, зеленым — 95 %, голубым — 99 %.

Таблица 1

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями ППО в 2011–2020 гг.

№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль
1	0,661	0,626	0,556	13	0,599	0,462	0,572	25	0,410	0,567	0,409
2	0,028	0,318	0,264	14	0,452	0,243	0,553	26	0,578	0,440	0,626
3	0,673	0,680	0,580	15	0,499	0,606	0,503	27	0,504	0,576	0,564
4	0,206	0,505	0,280	16	0,654	0,217	0,544	28	0,459	0,649	0,559
5	0,669	0,185	0,638	17	0,528	0,652	0,438	29	0,492	0,577	0,616
6	0,610	0,381	0,695	18	0,028	0,318	0,264	30	0,213	0,557	0,274
7	0,590	0,490	0,616	19	0,165	0,455	0,297	31	0,728	0,535	0,568
8	0,414	0,500	0,500	20	0,778	0,553	0,586	32	0,302	0,488	0,478
9	0,694	0,609	0,673	21	0,616	0,468	0,662	33	0,475	0,554	0,530
10	0,575	0,518	0,629	22	0,304	0,570	0,373	34	0,745	0,585	0,702
11	0,458	0,469	0,536	23	0,468	0,446	0,520	Якутск	0,494	0,595	0,511
12	0,597	0,469	0,719	24	0,722	0,329	0,572	Вся Якутия	0,628	0,545	0,683

Как следует из таблицы 1, вывод о значимости связей межгодовых изменений СТВ для мая в период 2012–2021 гг. с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год, характеризуется достоверностью не ниже 99 % для Нижнеколымского района и Эвено-Бытантайского национального улуса. Достоверность такого вывода превышала 95 % для Абыйского, Аллаиховского, Булунского, Верхоянского, Мирненского, Олёкминского районов, а также Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского) улуса. Как видим из рис. 2, рассматриваемые связи с указанной достоверностью могут быть признаны значимыми для районов и улусов Якутии, расположенных в ее северной и западной части.

Для июня такой же вывод справедлив с достоверностью не ниже 95 % для Аллаиховского, Момского и Томпонского районов. Для июля он адекватен с такой же достоверностью для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, а также Анабарского национального (Долгано-Эвенкийский), Эвено-Бытантайского национального и Жиганского улусов. Для всей Якутии рассматриваемый вывод справедлив с достоверностью не ниже 90 % для мая и июня и 95 % для июля.

В таблице 2 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями КЛП для периода 2011–2020 гг.

Таблица 2

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг., с вариациями КЛП для периода 2011–2020 гг.

№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль
1	0,859	0,675	0,393	13	0,734	0,630	0,516	25	0,723	0,659	0,164
2	0,069	0,450	0,226	14	0,352	0,243	0,433	26	0,520	0,479	0,491
3	0,872	0,744	0,525	15	0,600	0,804	0,533	27	0,608	0,797	0,536
4	0,325	0,694	0,310	16	0,605	0,239	0,420	28	0,601	0,875	0,552
5	0,757	0,297	0,731	17	0,746	0,799	0,303	29	0,579	0,791	0,613
6	0,748	0,507	0,749	18	0,069	0,450	0,226	30	0,348	0,687	0,318
7	0,568	0,593	0,507	19	0,071	0,463	0,313	31	0,835	0,653	0,511
8	0,716	0,591	0,188	20	0,897	0,596	0,544	32	0,332	0,679	0,426
9	0,760	0,703	0,583	21	0,607	0,512	0,565	33	0,584	0,773	0,572
10	0,542	0,654	0,545	22	0,557	0,763	0,349	34	0,818	0,706	0,592
11	0,489	0,673	0,517	23	0,326	0,490	0,381	Якутск	0,593	0,794	0,531
12	0,701	0,603	0,680	24	0,724	0,383	0,567	Вся Якутия	0,736	0,790	0,611

Из таблицы 2 следует, что вывод о значимости связей межгодовых изменений средних СТВ в 2012–2021 гг. для мая с вариациями КЛП за 2011–2020 гг. характеризуется достоверностью не ниже 0,99 для Абыйского, Аллаиховского, Булунского, Верхоянского, Момского, Нижнеколымского Усть-Янского районов и Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского), Эвено-Бытантайского национального, а также Кобяйского улусов.

Для июня указанный вывод с той же достоверностью справедлив для Момского, Томпонского района, Мегино-Кангаласского, Таттинского, Усть-Алданского Чурапчинский улуса, а также города Якутск.

Для июля он столь же адекватен лишь для Булунского района.

На всей территории Якутии рассматриваемый вывод справедлив с достоверностью: для мая — не ниже 95 %; для июня — не ниже 99 %; для июля — не ниже 90 %.

Из сравнения таблицы 1 и таблицы 2 понятно, что районы и улусы Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних СТВ с вариациями ППО и КЛП значимы, во многом совпадают, но достоверность выводов о значимости связей средних СТВ и КЛП (как для отдельных районов, так и Якутии в целом) заметно выше.

Аналогичные закономерности проявляются и в распределении по территории Якутии характеристик рассматриваемых связей для других изучаемых отрезков времени. При этом достоверность выводов о значимости связей средних СТВ и КЛП выше, чем аналогичная характеристика связей средних СТВ и ППО, не при любых значениях продолжительности изучаемых отрезков рассматриваемых временных рядов.

При решении второй задачи установлено, что выявленные для периода 2012–2021 гг. значимые статистические связи межгодовых изменений средних СТВ для месяцев с мая по июль, а также ППО или КЛП, опережающих их по времени на 1 год, сохраняют свою значимость и для многих других отрезков времени такой же длительности.

Как пример, в таблице 3 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню для отрезков времени 2011–2020 гг., 2012–2021 гг., 2013–2022 гг., 2014–2023 гг., с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год.

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, для различных улусов и районов Якутии, а также разных отрезков времени продолжительностью 10 лет с вариациями ППО, опережающими их на 1 год

№ улуса (района)	Период				№ улуса (района)	Период			
	2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023		2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023
1	0,583	0,626	0,625	0,719	19	0,419	0,455	0,494	0,500
2	0,139	0,318	0,415	0,425	20	0,546	0,553	0,554	0,630
3	0,615	0,680	0,679	0,723	21	0,454	0,468	0,465	0,463
4	0,272	0,505	0,651	0,663	22	0,449	0,570	0,619	0,613
5	0,320	0,185	0,186	0,263	23	0,063	0,446	0,442	0,456
6	0,362	0,381	0,381	0,489	24	0,442	0,329	0,324	0,406
7	0,363	0,490	0,487	0,481	25	0,425	0,567	0,564	0,638
8	0,509	0,500	0,514	0,584	26	0,109	0,440	0,436	0,431
9	0,612	0,609	0,606	0,648	27	0,412	0,576	0,687	0,704
10	0,437	0,518	0,520	0,513	28	0,495	0,649	0,732	0,741
11	0,273	0,469	0,492	0,483	29	0,429	0,577	0,620	0,633
12	0,451	0,469	0,476	0,511	30	0,374	0,557	0,882	0,880
13	0,588	0,462	0,597	0,603	31	0,552	0,557	0,588	0,640
14	–0,129*	0,243	0,235	0,250	32	0,225	0,488	0,533	0,535
15	0,430	0,606	0,662	0,675	33	0,416	0,554	0,654	0,671
16	–0,008*	0,217	0,208	0,221	34	0,544	0,585	0,589	0,654
17	0,609	0,652	0,655	0,701	Якутск	0,412	0,595	0,649	0,661
18	0,146	0,318	0,406	0,414	Вся Якутия	0,485	0,645	0,683	0,707

*Примечание:* \* Пределы значения коэффициента корреляции — от –1 до +1. Из таблицы видно, что отрицательные показатели незначимы (близки к нулю), а потому могут быть результатом действия неучтенных случайных факторов. Это же относится к малым положительным коэффициентам.

Таблица 3 показывает, что значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год, для отрезков времени 2013–2022 гг., 2014–2023 гг. превышают порог значимости, соответствующий достоверности 0,9, для всех районов и улусов Якутии, где такое имело место для периода 2012–2021 гг.

Для отрезка времени 2011–2020 гг. аналогичный вывод справедлив лишь для Абыйского, Аллаиховского, Верхоянского, Момского, Нижнеколымского районов, а также Усть-Янского, Кобяйского и Эвено-Бытантайского национального улуса. Из этого следует, что в современном периоде устойчивость выявленных связей с течением времени увеличивается. Как нетрудно заметить, при этом происходит и усиление этих связей.

Для периода 2011–2020 гг. улусов или районов Якутии, для которых достоверность вывода об их значимости для июня превышала 90 %, обнаружено всего восемь. При этом уровня 0,95 или 0,99 его достоверность где-либо не достигала.

Для периода 2012–2021 гг. таких районов выявлено 16, а районов, где достоверность того же вывода превосходила 95 %, обнаружено три. Уровня 99 % значения этого показателя также нигде не достигают.

Для периода 2013–2022 гг. районов, где достоверность того же вывода превосходила 90 %, выявлено 19. Уровень достоверности, равный 95 %, превышен в девяти районах. Для Усть-Майского улуса достоверность вывода о значимости изучаемых связей превышает 99 %.

Для периода 2014–2023 гг. достоверность рассматриваемого вывода превышает 90 % для 20 районов. Ее уровень, равный 95 %, превышает в 13 районах, а уровень 99 % — в двух (в Усть-Майском улусе и Томпонском районе).

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, для отрезков времени 2011–2020 гг., 2012–2021 гг., 2013–2022 гг., 2014–2023 гг., с вариациями КЛП, опережающими их по времени на 1 год, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ над улусами (районами) Якутии, для разных отрезков времени длиной 10 лет с вариациями КЛП на ее территории, опережающими их по времени на 1 год

№ улуса (района)	Период				№ улуса (района)	Период			
	2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023		2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023
1	0,617	0,675	0,715	0,830	19	0,427	0,463	0,450	0,458
2	0,340	0,450	0,456	0,470	20	0,549	0,596	0,647	0,742
3	0,721	0,744	0,777	0,841	21	0,480	0,512	0,560	0,559
4	0,494	0,694	0,756	0,774	22	0,652	0,763	0,767	0,764
5	0,327	0,297	0,298	0,401	23	0,445	0,490	0,510	0,530
6	0,409	0,507	0,513	0,653	24	0,267	0,383	0,404	0,508
7	0,341	0,593	0,614	0,611	25	0,629	0,659	0,682	0,776
8	0,588	0,591	0,629	0,718	26	0,467	0,479	0,519	0,514
9	0,619	0,703	0,731	0,786	27	0,543	0,797	0,842	0,867
10	0,635	0,654	0,658	0,654	28	0,626	0,875	0,903	0,918
11	0,569	0,673	0,667	0,662	29	0,662	0,791	0,794	0,814
12	0,608	0,603	0,623	0,672	30	0,590	0,687	0,876	0,873
13	0,694	0,630	0,785	0,796	31	0,488	0,593	0,657	0,762
14	–0,081*	0,243	0,317	0,337	32	0,464	0,679	0,679	0,684
15	0,598	0,804	0,813	0,832	33	0,555	0,773	0,809	0,835
16	–0,050*	0,239	0,327	0,345	34	0,558	0,706	0,738	0,822
17	0,655	0,799	0,802	0,863	Якутск	0,584	0,794	0,801	0,820
18	0,353	0,450	0,452	0,465	Вся Якутия	0,692	0,790	0,763	0,792

*Примечание:* \* Пределы значения коэффициента корреляции — от –1 до +1. Из таблицы видно, что отрицательные показатели незначимы (близки к нулю), а потому могут быть результатом действия неучтенных случайных факторов. Это же относится к малым положительным коэффициентам.

Таблица 4 свидетельствует о том, что значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, с вариациями КЛП, опережающими их по времени на 1 год, для отрезков времени 2013–2022 гг., 2014–2023 гг. также превосходят порог значимости, соответствующий достоверности 90 %, для всех районов или улусов Якутии, где такое имело место для периода 2012–2021 гг. Для всех рассматриваемых отрезков времени этот порог ими превышает для 19 улусов или районов Якутии (из 35 возможных, включая город Якутск).

Из этого следует, что устойчивость выявленных связей СТВ — КЛП к изменениям даты начала сопоставляемых отрезков изучаемых временных рядов длиной 10 лет выше, чем связей СТВ — ППО. При этом она с течением времени также повышается. Увеличивается количество районов, где достоверности вывода об их значимости превосходит 99 %.

Для периода 2011–2020 гг. таких районов не выявлено. Для периода 2012–2021 гг. их восемь, для отрезка времени 2013–2022 их 12, а для периода 2014–2023 гг. — 16.

Аналогичные особенности соответствуют рассматриваемым связям также для мая и июля.

Также при решении второй задачи определены улусы (районы) Якутии, для которых достоверность вывода о значимости коэффициента корреляции временных рядов средних СТВ для различных месяцев, а также рядов КЛП и ППО, опережающих их по времени на 1 год, составляла 95 % и 99 %, при условии, что они содержат от 10 до 20 членов.

Как пример, в таблице 5 представлены значения коэффициентов корреляции временных рядов средних СТВ над территориями различных улусов и районов Якутии для июня, соответствующих периодам 2001–2021 гг. и 2012–2021 гг., а также рядов КЛП и ППО для отрезков времени 2000–2020 гг. и 2011–2020 гг.

Значения коэффициентов корреляции рядов средних СТВ над территориями различных улусов и районов Якутии для июня, соответствующих периодам 2001–2021 гг. и 2012–2021 гг., а также рядов КЛП и ППО для отрезков времени 2000–2020 гг. и 2011–2020 гг.

СТВ — КЛП						СТВ — ППО					
№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021
1	0,521	0,675	19	0,115	0,463	1	0,657	0,626	19	0,142	0,455
2	0,131	0,450	20	0,515	0,596	2	0,139	0,318	20	0,617	0,553
3	0,597	0,744	21	0,327	0,512	3	0,643	0,680	21	0,525	0,468
4	0,302	0,694	22	0,341	0,763	4	0,312	0,505	22	0,396	0,570
5	0,276	0,297	23	0,197	0,490	5	0,399	0,185	23	0,218	0,446
6	0,451	0,507	24	0,222	0,383	6	0,517	0,381	24	0,467	0,329
7	0,340	0,593	25	0,559	0,659	7	0,493	0,490	25	0,525	0,567
8	0,559	0,591	26	0,255	0,479	8	0,598	0,500	26	0,384	0,440
9	0,461	0,703	27	0,324	0,797	9	0,584	0,609	27	0,382	0,576
10	0,341	0,654	28	0,322	0,875	10	0,486	0,518	28	0,394	0,649
11	0,336	0,673	29	0,379	0,791	11	0,364	0,469	29	0,451	0,577
12	0,358	0,603	30	0,276	0,687	12	0,515	0,469	30	0,304	0,557
13	0,484	0,630	31	0,518	0,606	13	0,560	0,462	31	0,627	0,513
14	0,053	0,243	32	0,339	0,679	14	0,199	0,243	32	0,348	0,488
15	0,464	0,804	33	0,340	0,773	15	0,460	0,606	33	0,389	0,554
16	0,214	0,239	34	0,453	0,706	16	0,428	0,217	34	0,573	0,585
17	0,530	0,799	Якутск	0,414	0,794	17	0,643	0,652	Якутск	0,454	0,595
18	0,127	0,450	Вся Якутия	0,457	0,790	18	0,131	0,318	Вся Якутия	0,566	0,645

Таблица 5 позволяет заключить, что для многих улусов и районов Якутии изучаемые связи для июня с достоверностью не ниже 95 % являются значимыми при значениях длины отрезков временных рядов, используемых для их изучения, равных как 10 лет, так и 20 лет.

Аналогичные выводы справедливы и для прочих значений длины изучаемых рядов из диапазона 10–20 лет, а также для месяцев май и июнь.

Как видим, результаты, полученные при решении второй задачи, позволяют утверждать, что выявленные значимые связи межгодовых изменений средних СТВ над улусами и районами Якутии с опережающими их по времени на 1 год вариациями КЛП и ППО обладают устойчивостью как к сдвигам этих рядов по времени, так и к изменениям их длины.

**Обсуждение.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что нашла подтверждение выдвинутая гипотеза о существовании улусов (районов) Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних СТВ для мая — июля текущего года с вариациями показателей горимости лесов на всей ее территории для предыдущего года являются значимыми и устойчивыми. Вместе с тем эти результаты нуждаются в содержательной интерпретации, сопоставлении с имеющимися научными данными и критическом анализе.

Прежде всего, обратим внимание на пространственное распределение улусов (районов) Якутии, для которых выдвинутая гипотеза подтвердилась. Как видно из таблиц 1 и 2, для мая наибольшие значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ с опережающими вариациями КЛП и ППО характерны для районов и улусов Якутии, которые расположены в северной и западной части ее территории. К таким районам относятся Абыйский, Аллаиховский, Булунский, Верхоянский, Нижнеколымский, и Усть-Янский. Соответствующими улусами являются Анабарский национальный и Эвено-Бытантайский национальный.

Для июня значимые связи характерны также для центральной и восточной Якутии (Аллаиховского, Момского и Томпонского районов).

Для июля выявленные связи значимы для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, а также Анабарского национального, Эвено-Бытантайского национального и Жиганского улусов (север Якутии).

Такое пространственное распределение представляется физически обоснованным. Северные районы Якутии, ландшафты которых представляют собой тундру и лесотундру, характеризуются более поздним началом таяния их снежного покрова. Поэтому механизм положительной обратной связи, описанный во введении, действует на их территориях дольше (с мая до июля).

В центральных районах Якутии, территории которых покрыты тайгой, снежный покров к июню уже в значительной мере сошел. В этом месяце происходит испарение влаги из горючего материала и транспирация в фитоценозах, где начинается вегетационный период. Эти процессы оказывают тем более интенсивное охлаждающее влияние на приземный слой атмосферы, чем больше влаги в горючем материале и доступно растениям. Так как к июлю горючий материал высыхает, интенсивность испарения из него влаги снижается, рассматриваемый механизм на таких территориях действует преимущественно в июне.

Для ряда районов и улусов, расположенных в южной и центральной части территории Якутии (Алданский, Нерюнгринский районы, Намский улус) значимых связей между изучаемыми процессами для какого-либо месяца не выявлено. Это может объясняться тем, что в южных районах в мае высыхание горючего материала уже завершено, вследствие чего ускорение таяния их снежного покрова, завершающееся к апрелю, на соответствующие им изменения средних СТВ как-либо влиять не может. Кроме того, характеристики ландшафтных комплексов южных районов Якутии являются существенно иными в сравнении с аналогичными характеристиками для районов центральной части ее территории, относящихся к зоне бореальных лесов. Здесь встречаются не только хвойные, но и широколиственные леса, а также лесостепи, где таяние снежного покрова и высыхание горючего материала происходит раньше. Вследствие чего на изменения средних СТВ над их территориями более существенным может являться влияние циркуляционных и иных климатических факторов, маскирующих изучаемый эффект.

Описанный в [7] физический механизм подтвердил выводы [8] о существенном влиянии осаждения продуктов горения на альбедо и скорость таяния снежного покрова. Нашли подтверждение представления [5] о механизме переноса сажи и аэрозолей от лесных пожаров в высоких широтах Сибири. Подтверждены выводы о роли ветров южных румбов, преобладающих здесь в осенне-зимние месяцы благодаря Сибирскому антициклону.

Заслуживает внимания установленный факт, состоящий в том, что достоверность выводов о значимости связей изменений средних СТВ с вариациями КЛП в целом заметно выше, чем аналогичная характеристика связей этих изменений с вариациями ППО. Это можно объяснить тем, что значение КЛП на территории любого района (улуса) в меньшей степени определяется случайными экстремальными событиями, нежели соответствующее значение ППО.

К таким событиям, влияющим как на КЛП, так и на ППО, относятся как природные явления (например, сухие грозы), так и последствия деятельности человека (непредумышленные и умышленные поджоги). На чувствительность изменений ППО к таким событиям влияет также режим контроля лесопожарной обстановки на участке территории, где возник пожар.

Если на таком участке контроль этой обстановки осуществляется всеми существующими, в том числе наземными средствами (в основном лесниками), ликвидация пожара на нем происходит, как правило, оперативно, а значения ППО невелики.

Пожар продолжается значительно дольше (вследствие чего больше и ППО) на участках, где мониторинг лесопожарной обстановки осуществляется только авиационными или космическими средствами. Такие участки обычно удалены от населенных пунктов и мест дислокации противопожарных подразделений, вследствие чего силы и средства, необходимые для ликвидации пожара, на них надо вначале доставить. Последнее может потребовать немало времени.

Пожар развивается без каких-либо ограничений по времени (пока его не погасит дождь) на участках, где лесопожарная обстановка контролируется космическими средствами, но ликвидация пожаров признается нецелесообразной. Такие участки на малонаселенной территории Якутии преобладают.

Повышение средних СТВ для упомянутых участков, как правило, приводит к существенному увеличению ППО. КЛП при этом также повышается, но менее значимо (сухие грозы возникают чаще). Один аномально крупный пожар на таких участках может существенно увеличить ППО в соответствующем улусе (районе), в то время к значению КЛП он добавляет всего лишь единицу.

К существенным результатам данной работы относится установленное усиление изучаемых связей в период 2000–2024 гг. Как следует из таблиц 3 и 4, при переходе от более ранних изучаемых отрезков к более поздним количество улусов, для которых достоверность вывода о значимости рассматриваемых связей превышает заданные пороговые уровни, возрастает. Так, для связей изменений средних СТВ в июне с вариациями КЛП количество районов, где достоверность превышает 99 %, увеличивается от нуля (для 2011–2020 гг.), до 16 (для 2014–2023 гг.).

Этот факт представляется весьма важным и допускает следующую интерпретацию. В условиях продолжающегося потепления климата интенсивность пожаров в Якутии возрастает (что видно из рис. 1), следовательно, увеличивается и количество образующихся продуктов горения. Последнее приводит к усилению механизма положительной обратной связи между горимостью лесов всей Якутии для предыдущего года, а также средними СТВ, а значит, и горимостью лесов рассматриваемого ее улуса (района) для текущего года. Иными словами, обнаруженное усиление статистических связей может отражать реальное усиление соответствующего физического механизма в условиях потепления климата, что согласуется с представлениями об активизации положительных обратных связей в климатической системе.

Выявленные свойства связей между изучаемыми процессами позволяют предположить, что их учет при разработке долгосрочных прогнозов средних СТВ и лесопожарной обстановки на территориях выявленных улусов (районов) Якутии способен повысить оправдываемость таких прогнозов.

Вместе с тем необходимо отметить, что применяемая методика исследования основана на ряде упрощающих допущений, корректная проверка которых не может быть осуществлена вследствие особенностей применяемого фактического материала. Наиболее существенным является допущение о нормальности распределения отклонений изучаемых показателей от соответствующих трендов. Справедливость такого допущения не может быть надежно проверена вследствие малой длины изучаемых временных рядов.

Хотя такая проверка с применением критерия Пирсона не выявила противоречий с этим предположением, мощность данного критерия при столь коротких выборках (10–20 членов) невелика. Вследствие этого отличия фактических законов распределения рассматриваемых величин от нормального закона (проявляющиеся на их хвостах) могли быть не выявлены. Следовательно, полученные результаты целесообразно рассматривать как носящие качественный характер.

Необходимо отметить также, что относительно небольшая длина изучаемых отрезков временных рядов ограничивает возможности их корреляционного анализа. В результате этого некоторые реально существующие, но умеренные по силе, связи могли оказаться не выявлены.

Следует отметить, что в работе рассматривались связи изменений средних СТВ для того или иного месяца над территориями отдельных улусов (районов) Якутии с опережающими их на 1 год вариациями показателей горимости ландшафтов на всей территории Якутии за весь пожароопасный сезон. Такой подход обоснован физическим механизмом изучаемого явления.

Продукты горения, образовавшиеся при пожаре в любом месяце и на любом участке территории Якутии, к началу периода формирования в изучаемом районе (улусе) снежного покрова (осень) могут быть доставлены в него ветром и участвовать в его загрязнении. Тем не менее, возможно, что исследование связей межгодовых изменений средних СТВ над каждым улусом (районом) Якутии с вариациями показателей горимости в определенных зонах территории Якутии могло бы уточнить полученные результаты и повысить их прогностическую ценность.

Несомненный интерес представляет также изучение влияния на изменения средних СТВ тех или иных улусов (районов) Якутии изменений состояния и видового состава фитоценозов на местностях, где произошли ландшафтные пожары, а также других факторов, способных влиять на вариации альбедо их снежного покрова в весенние и летние месяцы.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения лесопожарной обстановки на территориях некоторых улусов Якутии регулируются положительной обратной связью, которая при потеплении климата усиливается. Поскольку последнее может представлять существенную опасность для населения, экосистем и экономики, актуальным является ускоренное и адекватное развитие сил и средств соответствующих противопожарных подразделений Якутии.

**Заключение.** Таким образом, справедливость выдвинутой гипотезы подтверждена. Доказано, что значимыми факторами межгодовых изменений средних по соответствующим территориям среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы над многими улусами и районами республики Саха (Якутия), на отрезках времени от 10 до 20 лет являются вариации показателей горимости лесов на всей ее территории, опережающие их по времени на 1 год. Достоверность выводов об их значимости для многих таких территорий превышает 95 %, а для некоторых и 99 %.

Установлено, что указанные связи являются значимыми лишь для месяцев с мая по июль, что соответствует физическому механизму влияния продуктов горения на альбедо снежного покрова и, как следствие, на температурный режим в период весеннего снеготаяния.

Выявлены улусы и районы Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних по их территориям среднемесячных температур воздуха, с опережающими на 1 год вариациями показателей горимости их лесов значимы с достоверностью не ниже 95 %.

Для мая это преимущественно северная и западная части территории республики (Абыйский, Аллаховский, Булунский, Верхоянский, Нижнеколымский, Усть-Янский районы, Анабарский национальный и Эвено-Бытангайский национальный улусы и ряд других). Для июня значимые связи выявлены также для центральных и восточных районов (Момский, Томпонский районы, Мегино-Кангаласский, Таттинский, Чурапчинский улусы и др.). Для июля — для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, Анабарского национального, Эвено-Бытангайского национального и Жиганского улусов.

Связи изучаемых процессов с указанными факторами в современном периоде обладают устойчивостью к сдвигам годов, соответствующих началам сопоставляемых отрезков изучаемого процесса и его факторов в прошлое и будущее на единицы лет, а также к изменениям их продолжительности в пределах 10–20 лет. При этом в период 2000–2024 гг. связи изучаемых процессов и их факторов для выявленных улусов усиливаются (с течением времени возрастают как значения коэффициентов корреляции, характеризующих изучаемые связи, так и количество улусов, для которых эти связи являются значимыми).

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности разработки для выявленных улусов (районов) республики Саха (Якутия) прогнозов на предстоящий год средних по их территориям среднемесячных температур воздуха для весенних и летних месяцев, а также пожароопасности по метеоусловиям. Учитывая это, к перспективным направлениям дальнейших исследований относятся:

- разработка для выявленных улусов Якутии прогнозов на предстоящий год межгодовых изменений температурного режима и пожарных рисков, а также исследование их свойств;
- выявление районов других субъектов Российской Федерации, для которых изученные связи обладают близкими свойствами и также могут быть использованы при прогнозировании для них пожарной опасности.

#### Список литературы / References

1. Валендик Э.Н., Кисильхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарев Е.И., Данилова И.В. Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2014;(3):73–86. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-73-86>
- Valendik EN, Kisilyakhov YeK, Ryzhkova VA, Ponomarev EI, Danilova IV. Landscape Wildfires Nature in Central Siberian Taiga. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2014;(3):73–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-73-86>
2. Ponomarev EI, Kharuk VI, Renson KJ. Wildfires in Siberia: Trends and Climatic Drivers. *Environmental Research Letters*. 2016; 07(06):125. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/7/6/125> (accessed 15.04.2026).
3. Buryak LV, Kukavskaya EA, Ivanov VA, Malykh OF, Kotelnikov RV. Assessment of Fire Hazard and Its Dynamics in Forest Areas of Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2021;14:803–814. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070040>
4. Petrov IA, Shushpanov AS, Golyukov AS, Dvinskaya ML, Kharuk VI. Wildfire Dynamics in Pine Forests of Central Siberia in a Changing Climate. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;16:36–46. <https://doi.org/10.1134/S1995425523010067>
5. Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Сергеев И.Ю., Батуру А.Н., Проскова Н.Ю. *Физические основы теории долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования рисков возникновения ландшафтных пожаров*. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России; 2024. 337 с. URL: <https://profspo.ru/books/140586> (дата обращения: 16.06.2025).
- Kholoptsev AV, Shubkin RG, Sergeev IYu, Baturu AN, Proskova NYu. *The Physical Foundations of the Theory of Long-Term and Ultra-Long-Term Forecasting of Risks of Landscape Fires*. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2024. 337 p. (In Russ.) URL: <https://profspo.ru/books/140586> (accessed: 16.06.2025).
6. Шубкин Р.Г. Результаты долгосрочного прогнозирования крупномасштабных лесных пожаров в Байкальском регионе. *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2016;3:35–38.
- Shubkin RG, Shirinkin PV. Long-Term Forecasting Results of Large-Scale Forest Fires in the Baikal Region. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2016;3:35–38. (In Russ.)
7. Будыко М.И. *Климат в прошлом и будущем*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1980. 352 с.
- Budyko MI. *Climate in the Past and the Future*. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1980. 352 p. (In Russ.)
8. Нестеров В.Г. *Горимость леса и методы ее определения*. Москва: Гослесбумиздат; 1949. 76 с.
- Nesterov VG. *Forest Burnability and Methods of its Determination*. Moscow: Goslesbumizdat; 1949. 76 p. (In Russ.)
9. Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д. Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей. В кн.: *70 лет Гидрометцентру России*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 1999. С. 141–165.
- Filatov AN, Muravyov AV, Resnyansky YuD. Long-Term Meteorological Forecast: Mathematical Problems and Possibilities of Hydrodynamic Models. In book: *70 Years of the Hydrometeorological Center of Russia*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 1999. P. 141–165. (In Russ.)
10. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А. и др. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019;4(374):12–36.
- Vilfand RM, Zaripov RB, Kiktev DB, Kruglova EN, Kryjov VN, Kulikova IA, et al. Long-Range Forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019;4(374):12–36. (In Russ.)
11. Шешуков М.А., Ковалев А.П., Орлов А.М., Позднякова В.В. Проблемы и перспективы охраны лесов от пожаров. *Сибирский лесной журнал*. 2020;2:14–20. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200202>
- Sheshukov MA, Kovalev AP, Orlov AM, Pozdnyakova VV. Problems and Prospects of Protecting Forests from Fires. *Siberian Journal of Forest Science*. 2020;2:14–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/SJFS20200202>

12. Волокитина А.В., Софронов М.А., Корец М.А., Софронова Т.М., Михайлова И.А. *Прогноз поведения лесных пожаров*. Красноярск: СО РАН, Институт леса им. В.Н. Сукачева; 2010. 211 с.

Volokitina AV, Sofronov MA, Korets MA, Sofronova TM, Mikhailova IA. *Forecast of Forest Fire Behavior*. Krasnoyarsk: V.N. Institute of Forest of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences; 2010. 211 p. (In Russ.)

13. Холопцев А.В., Никифорова М.П. *Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов*. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013. 333 с.

Kholoptsev AV, Nikiforova MP. *Solar Activity and Forecasts of Physical and Geographical Processes*. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013. 333 p. (In Russ.)

14. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И., Юлин А.В., Афанасьева Е.В. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов. *Российская Арктика*. 2021;15:40–53. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-40-53>

Mironov YeU, Klyachkin SV, Makarov YeI, Yulin AV, Afanasyeva EV. Sea Ice Processes in the Russian Arctic Seas in Autumn of 2021 and Estimation of Ice Forecasts Accuracy. *Russian Arctic*. 2021;15:40–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-40-53>

15. Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Мирвис В.М., Матюгин В.А., Пичугин Ю.А., Вавулин С.В. Гидродинамико-статистический долгосрочный прогноз метеорологических полей по модели ГГО. 2. Результаты оперативных испытаний и перспективы улучшения прогностической схемы. *Метеорология и гидрология*. 2002;10:5–17.

Meleshko VP, Gavrilina VM, Mirvis VM, Matyugin VA, Pichugin YuA, Vavulin SV. Statistical Hydrodynamic Long-Range Forecast of Meteorological Fields with the MGO Model. 2. Operational Test Results and Prospects of Improving the Prognostic Scheme. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2002;10:5–17. (In Russ.)

16. Федорова Е.Н., Пахомов Е.А. *Административно-территориальное устройство Якутии. Прошлое и настоящее*. Новосибирск: Наука; 2011. 145 с.

Fedorova EN, Pakhomov EA. *Administrative-Territorial Structure of Yakutia. Past and Present*. Novosibirsk: Nauka; 2011. 145 p. (In Russ.)

17. Hoffmann L, Dan Li, Stein O, Günther G. From ERA-Interim to ERA5: the Considerable Impact of ECMWF's Next-Generation Reanalysis on Lagrangian Transport Simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019;19(5):3097–3124. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>

#### **Об авторах:**

**Александр Вадимович Холопцев**, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры «Контрольно-надзорная деятельность» Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [kholoptsev@mail.ru](mailto:kholoptsev@mail.ru)

**Роман Геннадьевич Шубкин**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Контрольно-надзорная деятельность», Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru](mailto:shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru)

**Юлия Николаевна Коваль**, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и процессы горения», Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

#### **Заявленный вклад авторов:**

**А.В. Холопцев:** Разработка концепции, написание чистовика рукописи, научное руководство.

**Р.Г. Шубкин:** Написание черновика рукописи, визуализация.

**Ю.Н. Коваль:** Написание черновика рукописи, визуализация.

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

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

#### **About the Authors:**

**Aleksandr V. Kholoptsev**, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Professor of the Department of Control and Supervision, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [kholoptsev@mail.ru](mailto:kholoptsev@mail.ru)

**Roman G. Shubkin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Control and Supervision, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru](mailto:shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru)

**Yuliya N. Koval**, Cand.Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Combustion Processes, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

***Claimed Contributorship:***

**AV Kholoptsev:** conceptualization, writing – review & editing, supervision.

**RG Shubkin:** writing – original draft preparation, visualization

**YuN Koval:** writing – original draft preparation, visualization

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 03.02.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 30.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 15.04.2026

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 331.461

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-95-106>

### Индивидуальный уровень ответственности и эмоциональности как фактор реализации опасных производственных событий

 Н.М. Герасименко<sup>1</sup> , Е.В. Глебова<sup>2</sup> , Ю.О. Рогозин<sup>3</sup> 
<sup>1</sup> ООО «Эксплон», г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация<sup>3</sup> ООО «Газпром трансгаз Сургут», г. Сургут, Российская Федерация✉ [gerasimenko\\_nadezhda\\_944@mail.ru](mailto:gerasimenko_nadezhda_944@mail.ru)

EDN: JCNXXH

#### Аннотация.

**Введение.** Человеческий фактор — причина 70–80 % несчастных случаев на производстве. Этим обусловлен научный интерес к данной теме. Изучаются вопросы оценки рисков производственного травматизма в зависимости от индивидуальных качеств работников. Однако при анализе связи таких качеств и опасных инцидентов не задействуются непараметрические методы. При этом подходы параметрической статистики для обработки нечисловой информации необоснованны без предварительной проверки распределения переменных на нормальность. Представленная научная работа призвана исправить ситуацию. Цель — выявление и статистическое обоснование связи индивидуальных факторов и реализованных производственных рисков.

**Материалы и методы.** Авторы наблюдали за персоналом ООО «Газпром трансгаз Сургут», создали опросник, анонимно опросили 569 рабочих. Измерили выраженность у респондентов ответственности (по 34 утверждениям) и эмоциональности (по 26 утверждениям). При обработке данных задействовали восемь переменных: «травма», «возраст», «образование», «стаж на предприятии», «общий стаж», «профессия», «ответственность», «эмоциональность». Обобщались утверждения 206 человек (36,2 %) с опытом травм и профессиональных заболеваний и 363 (63,8 %) без такого опыта. По таблицам сопряженности исследовали взаимосвязь независимых переменных и зависимой («травма»). Оценки хи-квадрата Пирсона и уровня его статистической значимости дополнили расчетами интенсивности и направления связи переменных (коэффициент гамма).

**Результаты исследования.** Доказана высокая внутренняя согласованность утверждений (альфа Кронбаха 0,923) и высокая содержательная валидность опросника. Значимость ( $p < 0,001$ ) для всех переменных позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о подчинении исследуемой совокупности признаков нормальному распределению. Медианы частот переменных «степень ответственности» и «эмоциональность» для группы без травм — соответственно 2 и 3, а в группе с травмой заметно выше (5 и 5). Групповые различия в утверждениях статистически значимы ( $p < 0,05$ ). У работников с реализованными рисками выше величины средних рангов по качественной выраженности ответственности и эмоциональности. Для социально-демографических показателей нет значимой разницы по группирующему признаку «травма» ( $p > 0,05$ ). Получили значение хи-квадрата Пирсона 78,704 для пары «ответственность — травма» и 35,350 — для пары «эмоциональность — травма». Гамма — соответственно 0,514 и 0,359. Коэффициент Спирмена 0,344 — для ответственности и травмы, 0,242 — для эмоциональности и травмы. Значимость всех трех критериев  $< 0,001$ .

**Обсуждение.** Исход рисков определяется индивидуальными, а не социально-демографическими характеристиками работников. На это указывают:

- высокие медианы частот переменных «ответственность» и «эмоциональность» в группе «Травма»;
- средние ранги у респондентов с реализованными опасными событиями ( $p < 0,05$ ).

Риск растет при увеличении выраженности признаков эмоциональной неустойчивости и низкой ответственности. Связь «ответственности» и «травмы» по гамме сильнее, чем по Спирмену, следовательно, гамма лучше учитывает нелинейные монотонные тренды и показывает более существенную монотонную среднюю связь.

**Заключение.** Ответственность и эмоциональность — значимые детерминанты опасных инцидентов. Результаты исследования позволят развивать охрану труда, лучше подбирать персонал. В перспективе можно выстроить персонифицированную (адресную) работу с сотрудниками и в зависимости от их индивидуальных качеств прогнозировать реализацию опасных событий.

**Ключевые слова:** детерминанты опасных инцидентов, низкая ответственность как фактор риска, эмоциональность как фактор риска, профессиональный риск, обработка нечисловой информации

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность работникам ООО «Газпром трансгаз Сургут», принявшим участие в научном исследовании.

**Для цитирования.** Герасименко Н.М., Глебова Е.В., Рогозин Ю.О. Индивидуальный уровень ответственности и эмоциональности как фактор реализации опасных производственных событий. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):95–106. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-95-106>

Original Empirical Research

## Individual Level of Responsibility and Emotionality as a Factor in the Occurrence of Hazardous Industrial Events

Nadezhda M. Gerasimenko<sup>1</sup>  , Elena V. Glebova<sup>2</sup> , Yuri O. Rogozin<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> EXPLON LLC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Gazprom Transgaz Surgut LLC, Surgut, Russian Federation

 [gerasimenko\\_nadezhda\\_944@mail.ru](mailto:gerasimenko_nadezhda_944@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The human factor is the cause of 70–80% of industrial accidents. This is the reason for scientific interest in this topic. Researchers are studying the issues of assessing occupational injury risks based on individual employee qualities. However, nonparametric methods are not used when analyzing the relationship between these qualities and hazardous incidents. At the same time, parametric statistical approaches for processing non-numeric information are unreasonable without first checking the distribution of variables for normality. The presented scientific work is intended to correct the situation. The aim is to identify and statistically substantiate the relationship between individual factors and realized production risks.

**Materials and Methods.** The authors observed the staff of Gazprom Transgaz Surgut LLC and created a questionnaire. They anonymously interviewed 569 workers and measured their level of responsibility (according to 34 statements) and emotionality (according to 26 statements). Eight variables were used in data processing: “injury”, “age”, “education”, “length of service in the company”, “total years of service”, “profession”, “responsibility”, and “emotionality”. The statements of 206 people (36.2%) with experience of injuries and occupational diseases and 363 (63.8%) without such experience were summarized. The correlation of independent variables and dependent variable (“injury”) was studied using the contingency tables. Estimates of the Pearson’s chi-square and the level of its statistical significance were supplemented by calculations of the intensity and direction of the relationship of variables (gamma coefficient).

**Results.** High internal consistency of the statements (Cronbach's alpha 0.923) and high content validity of the questionnaire have been proven. The significance ( $p < 0.001$ ) for all variables allowed us to reject the null hypothesis about the subordination of the studied set of features to a normal distribution. Median frequencies of the “degree of responsibility” and “emotionality” variables for the group without injuries were 2 and 3, respectively, and noticeably higher in the group with injuries (5 and 5). The group differences in the statements were statistically significant ( $p < 0.05$ ). Employees with realized risks had higher than average ranks in terms of qualitative severity of responsibility and emotionality. There was no significant difference in socio-demographic indicators for the grouping feature “injury” ( $p > 0.05$ ). The Pearson’s chi-square value was 78.704 for the “responsibility — injury” pair and 35.350 for the “emotionality — injury” pair. Gamma was 0.514 and 0.359, respectively. Spearman's coefficient was 0.344 for responsibility and injury, 0.242 for emotionality and injury. The significance of all three criteria was  $< 0.001$ .

**Discussion.** The outcome of risks was determined by individual rather than socio-demographic characteristics of the employees. This was indicated by:

- high median frequencies of “responsibility” and “emotionality” variables in the “injury” group,
- average ranks among respondents with realized hazardous events ( $p < 0.05$ ).

The risk increased with increasing severity of signs of emotional instability and low responsibility. The relationship between “responsibility” and “injury” in gamma was stronger than in Spearman’s, therefore, gamma better accounted for nonlinear monotonic trends and showed a more significant monotonic average relationship.

**Conclusion.** Responsibility and emotionality are significant determinants of hazardous incidents. The research results will allow us to develop occupational safety and select staff more effectively. In the future, it is possible to build personalized (targeted) approaches to work with employees, and depending on their individual characteristics, predict the occurrence of hazardous events.

**Keywords:** determinants of hazardous incidents, low responsibility as a risk factor, emotionality as a risk factor, occupational risk, processing of non-numerical information

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the employees of Gazprom Transgaz Surgut LLC for their participation in the research.

**For Citation.** Gerasimenko NM, Glebova EV, Rogozin YuO. Individual Level of Responsibility and Emotionality as a Factor in the Occurrence of Hazardous Industrial Events. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):95–106. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-95-106>

**Введение.** Комплексное воздействие на работника вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса потенциально увеличивает профессиональные риски и опасные события (производственный травматизм, профессиональное заболевание). Онтология профессионального риска — это возможность реализации опасного события и тяжесть его последствий.

Исход профессионального риска заранее неизвестен, может быть значительным и тяжелым. Невозможно заранее определить ни количество травм, ни работников, которые их получают. Травма обусловлена случайной величиной — потенциалом возможностей, которые реализуются под действием некоего стохастического механизма [1]. Предположим, что компонентом стохастического механизма является индивидуальный фактор, а именно: особенности конкретного человека, влияющие на эффективность его профессионально-трудовой деятельности. Это допущение позволяет выдвинуть гипотезу, что в детерминации профессионального риска и реализации опасного события важную роль играют перечисленные ниже индивидуальные (личные, субъективные) качества работника:

- морально-нравственные (ответственность, дисциплинированность и др.);
- профессиональные (знания, навыки, умения, профессиональная подготовка и др.);
- психологические (особенности личности, профессионально важные качества и др.);
- физиологические (состояние здоровья, биоритмы и др.);
- физические (сила, выносливость, скорость реакции и др.).

В [2] рассматриваются вопросы оценки индивидуальных психических, психологических, физических качеств работников и риска производственного травматизма.

Функциональный подход к изучению причин профессиональных рисков позволяет выделить источники рисков:

- общие, объективные, обусловленные производственной средой (высота, шум, вибрация, электрический ток и т.д.) [3];
- субъективные, обусловленные индивидуальными качествами работника, исполняющего трудовые обязанности в данный момент (темперамент, мотивация и т.д.).

В [4] персонал предприятия рассматривается с позиций источника риска. Указано, что человеческий фактор — причина 70–80 % несчастных случаев на производстве. На штатно работающем предприятии опасные события реализуются из-за легкомыслия, суетливости, нарушений дисциплины, халатного отношения к правилам безопасного ведения работ.

В научной литературе описано влияние человеческого фактора на возможность реализации производственных рисков. При этом не представлен анализ связи индивидуальных качеств работников и реализованных опасных событий с использованием непараметрических методов статистического вывода. Применение методов параметрической статистики для обработки нечисловой информации необоснованно без предварительной проверки распределения переменных на нормальность.

В данном исследовании индивидуальные качества эмоциональность и ответственность рассматриваются как факторы реализации опасных производственных ситуаций.

Эмоциональность традиционно изучается как компонент темперамента и представляет совокупность качеств, описывающих динамику возникновения, протекания и прекращения эмоциональных состояний. Темперамент в течение жизни практически не меняется.

Ответственность как свойство личности тесно связана с мотивацией. Мотив характеризует субъективное, изменчивое отношение человека к определенным предметам и явлениям окружающего мира. Результаты изучения мотивации работников на предприятии представлены в [5]. В [6] исследуются дискуссионные вопросы о влиянии на производственный процесс целенаправленных активностей (действий) работника. В [7] ошибки сотрудников рассматриваются как основная категория причин производственного травматизма. В [8] статистически обосновывается связь производственного травматизма с поведением работника (спешка, работа в состоянии усталости, несоблюдение режима труда и отдыха и т.д.). В [9] анализируются ошибки персонала (оплошности, нарушения и др.) и с помощью методов аналитической статистики показывается, что человек — ключевая причина реализованных опасных событий на предприятии.

Таким образом, выявление связи индивидуальных факторов с реализованными опасными событиями (производственный травматизм, профессиональное заболевание) представляется актуальной задачей и требует более глубокого изучения.

Цель настоящего исследования — выявление и статистическое обоснование связи индивидуальных факторов и реализованных опасных событий.

Задачи настоящего исследования:

- 1) анализ литературных источников о влиянии человеческого фактора на производственный травматизм;
- 2) обоснование выбора методов непараметрической статистики для анализа нечисловых данных;
- 3) проведение эксперимента;
- 4) обработка эмпирических данных с использованием методов непараметрической статистики;
- 5) определение направления дальнейшего исследования.

**Материалы и методы.** Ниже представлены пять этапов данной научной работы:

- 1) наблюдение за поведением работников;
- 2) разработка опросника;
- 3) проведение анонимного опроса;
- 4) проверка опросника на надежность и валидность;
- 5) статистическая обработка эмпирических данных.

Для исследования взаимосвязи индивидуальных факторов и реализованных опасных событий разработан опросник. Он измеряет выраженность категорий показателей, определяющих индивидуальные качества работников — ответственность и эмоциональность.

В течение девяти лет шло наблюдение за рабочими и нерабочими ситуациями на предприятии, людей спрашивали об отношении к требованиям охраны труда, к здоровью, к оценке своего опыта, к членам коллектива. Беседовали также о субъективном восприятии источников профессиональных рисков, расцениваемых работниками как не зависящие от их действий.

Опросник содержит два блока утверждений.

Первый «Ответственность» описывает отношение респондента (работника) к коллективу, к себе, к своему здоровью и измеряет личную ответственность — важную мотивационную составляющую личности. Для этого блока сформулировали 34 утверждения.

Второй блок «Эмоциональность» измеряет ее выраженность и описывает различные эмоциональные состояния. Для блока «Эмоциональность» сформулировали 26 утверждений.

Все утверждения изложены от первого лица в однозначной для толкования утвердительной форме и доступны для понимания. На каждое утверждение предусмотрен один из четырех вариантов ответа: «нет, не согласен», «пожалуй, нет / маловероятно», «пожалуй, да / возможно», «да, согласен». Утверждения составлены таким образом, что выбор респондентами ответов «пожалуй, да / возможно» или «да, согласен» качественно выражает признаки низкой степени ответственности и эмоциональной неустойчивости.

Ниже приводятся примеры утверждений из блока «Ответственность»:

- если на предприятии я разобью ртутный термометр, я скрою этот факт;
- захламленность моего рабочего места меня вполне устраивает, ведь я точно знаю, что где лежит, и быстро нахожу нужное;
- если дано срочное задание, я закрываю глаза на требования безопасности.

Далее — примеры утверждений из блока «Эмоциональность»:

- когда руководитель обесценивает мой труд, я расстраиваюсь;
- иногда я разговариваю с другими работниками на повышенных тонах;
- у меня вызывает нетерпение долгий поиск необходимого рабочего инвентаря (документов, расходных материалов).

Опросник содержит информацию по социально-демографическим показателям (возраст, образование, стаж работы на данном предприятии, общий стаж работы, профессия) и по фактам несчастных случаев, микротравм и профессиональных заболеваний.

Необходимо отметить, что опросник, безусловно, имеет свои недостатки, а именно: исходные эмпирические данные зависят не только от искренности респондента, но и от его умения выражать свое мнение и анализировать свои действия, ситуативные эмоциональные реакции.

Эмпирически выявляются основные критерии пригодности опросника в качестве рабочего инструмента — его надежность и валидность. Надежность опросника характеризуется внутренней согласованностью утверждений. Статистический показатель внутренней согласованности утверждений в опроснике — альфа Кронбаха. Эта величина варьируется от 0 (согласованность отсутствует) до 1 (полная согласованность) [10].

Определение содержательной валидности позволяет выявить соответствие утверждений измеряемым индивидуальным качествам. Смысловую адекватность утверждений оценивали эксперты (руководители структурных подразделений) с использованием метода формальной логики.

Анонимный опрос проводили онлайн в «Яндекс Формах». Респонденты — работники рабочих профессий основного и вспомогательного производств газотранспортного предприятия ( $n = 569$ ). Их проинформировали о цели научного исследования профессиональных рисков, но не о категориях показателей, которые измеряет опросник. Результаты опроса использовались в обобщенном виде.

Для вычисления индивидуальных оценок по блокам «Ответственность» и «Эмоциональность» суммировали частоты выбора ответов «пожалуй, да / возможно» и «да, согласен». Иными словами, измерялись признаки качественной выраженности у респондентов показателей эмоциональной неустойчивости и низкого уровня ответственности.

Для обработки эмпирических данных создали восемь категориальных переменных. Это зависимая переменная «травма» и независимые: «возраст», «образование», «стаж работы на данном предприятии», «общий стаж работы», «профессия», «степень ответственности», «эмоциональность». Переменные «степень ответственности» и «эмоциональность» ранжировали и разделили на четыре группы.

Для создания бинарной (дихотомической) зависимой переменной «травма» работников разделили по качественному признаку на две группы.

1-я группа «Травма» ( $n = 206, 36,2\%$ ) — работники, получившие травму и (или) профессиональное заболевание на предприятии. Учитывался негативный опыт на данном предприятии и на предыдущих местах работы. Речь идет о микротравмах, профессиональных заболеваниях, телесных повреждениях (сильные ушибы, растяжения, переломы, ожоги, глубокие порезы и т.д.).

2-я группа «Без травмы» ( $n = 363, 63,8\%$ ) — работники, не получившие травму и (или) профессиональное заболевание на предприятии.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программном комплексе IBM SPSS Statistics 23 [10]. Критический уровень значимости  $p$  при проверке нулевых гипотез (гипотез об отсутствии связи) принимался равным 0,05. В случае превышения уровня значимости статистического критерия этой величины принималась нулевая гипотеза об отсутствии взаимосвязи между переменными.

Оценка распределения качественных переменных в исследуемой совокупности признаков проводилась с помощью одновыборочного критерия Колмогорова — Смирнова [11]. Проверялась нулевая гипотеза о соответствии имеющихся распределений нормальному.

Оценивалась достоверность различий между исследуемыми группами по качественной выраженности показателей ответственности и эмоциональности. С этой целью для всех утверждений опросника применялись ранговые критерии:  $U$ -критерий Манна — Уитни и критерий Краскела — Уоллиса. Такой подход позволяет путем анализа ранжированных значений выявить статистически значимые различия между независимыми группами:

- двумя ( $U$ -критерий Манна Уитни);
- тремя и более (критерий Краскела Уоллиса).

Проверялась нулевая гипотеза о совпадении распределений двух выборок [11]. Из дальнейшего анализа исключили утверждения, по которым между группами «Травма» и «Без травмы» не выявили статистически значимых различий.

Для исследования взаимосвязи между независимыми переменными и зависимой переменной «травма» использовали анализ таблиц сопряженности. Оценки критерия хи-квадрат Пирсона и достигнутого уровня статистической значимости этого критерия дополнили рассчитанными оценками интенсивности и направлением связи исследуемых переменных (ранговый коэффициент корреляции гамма). Проверялась нулевая гипотеза об отсутствии статистической взаимосвязи между переменными, т.е. о независимости признаков [11]. Абсолютный показатель критерия хи-квадрат Пирсона определяется количеством строк и столбцов в таблице сопряженности, поэтому не позволяет однозначно судить о наличии или отсутствии статистической взаимосвязи между исследуемыми переменными. Ключевым является показатель асимптотической значимости этого критерия [11].

**Результаты исследования.** Альфа Кронбаха для авторского опросника (0,923) свидетельствует о высокой внутренней согласованности утверждений. Отмечена также высокая степень содержательной валидности.

Результаты показали малую величину ( $p < 0,001$ ) достигнутого уровня значимости для всех исследуемых переменных. Это позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о подчинении исследуемой совокупности признаков нормальному распределению. Следовательно, в статистическом анализе данных правомерно использовать только непараметрические методы [11].

Все анализируемые переменные относятся к неметрическим (номинальной или порядковой) шкалам качественных признаков (таблица 1).

Принадлежность переменных из опросника к шкалам измерений

Переменные	Показатели	Тип шкалы измерения
Возраст	Менее 25 лет 26–40 лет 41–60 лет 61 год и старше	Порядковая
Образование	Школа Техникум Институт	
Стаж работы на данном предприятии	Менее 1 года 1–5 лет 6–15 лет Более 15 лет	
Общий стаж работы	Менее 5 лет 5–20 лет 21–30 лет Более 30 лет	
Профессия	Работники рабочих профессий основного производства Работники рабочих профессий вспомогательного производства	Номинальная
Степень ответственности	Четыре группы по частоте выбора ответов «Пожалуй, да / возможно» и «Да, согласен»	Порядковая
Эмоциональность	Четыре группы по частоте выбора ответов «Пожалуй, да / возможно» и «Да, согласен»	
Травма	Да Нет	Номинальная

Известная типология шкал (номинальная, порядковая, интервальная, шкала отношений) основана на допустимых к применению в этих шкалах операциях и преобразованиях. Согласно теории измерений, анализируемые данные строго формально имеют нечисловую природу, т.к. при измерениях в номинальной и порядковой шкалах нет информации о величине различий (разности) между элементами в исследуемой совокупности. Следовательно, какие-либо арифметические действия (сложение, умножение, возведение в степень, расчет среднего арифметического значения и т.д.) с полученными значениями не имеют смысла.

Из мер центральной тенденции к изучаемым данным правомерно применять медиану и моду. Медианы частот переменных «степень ответственности» и «эмоциональность» исследуемых групп приведены в таблице 2.

Таблица 2

Медианы частот переменных «степень ответственности» и «эмоциональность» исследуемых групп

Переменная	Группа «Без травмы»	Группа «Травма»
Степень ответственности	2	5
Эмоциональность	3	5

Из таблицы 2 видно, что медианы частот переменных «степень ответственности» и «эмоциональность» выше в группе «Травма».

С помощью рангового *U*-критерия Манна — Уитни выявлены статистически значимые различия в ответах на утверждения между исследуемыми группами ( $p < 0,05$ ). Выборочные примеры утверждений приводятся в таблице 3.

Оценка различий между группами по качественной выраженности признаков степени ответственности и эмоциональности

Утверждение	Группа	Средний ранг	U-критерий Манна — Уитни	
			величина	значимость
Блок «Ответственность» (примеры)				
Захламленность моего рабочего места меня вполне устраивает, ведь я точно знаю, что где лежит, и быстро нахожу нужное	Без травмы (n = 363)	276,24	34207,50	0,017
	Травма (n = 206)	300,44		
Если дано срочное задание, я закрываю глаза на требования безопасности	Без травмы (n = 363)	265,28	30232,00	0,000
	Травма (n = 206)	319,74		
Я прихожу на работу с температурой выше 37 градусов	Без травмы (n = 363)	262,03	29050,50	0,000
	Травма (n = 206)	325,48		
Блок «Эмоциональность» (примеры)				
Я легко вступаю в споры с окружающими	Без травмы (n = 363)	272,19	32739,00	0,007
	Травма (n = 206)	307,57		
Я рассуждаю вслух сам с собой и комментирую свои действия восклицаниями	Без травмы (n = 363)	275,25	33851,50	0,025
	Травма (n = 206)	302,17		
Меня раздражает человек, который в магазине на кассе долго считает мелочь и задерживает очередь	Без травмы (n = 363)	266,35	30618,50	0,000
	Травма (n = 206)	317,87		

Из таблицы 3 видно, что величины средних рангов выше у работников с реализованными опасными событиями ( $p < 0,05$ ).

Для визуализации статистически значимых различий выраженности индивидуальных качеств между исследуемыми группами построены гистограммы относительных частот (рис. 1, 2).

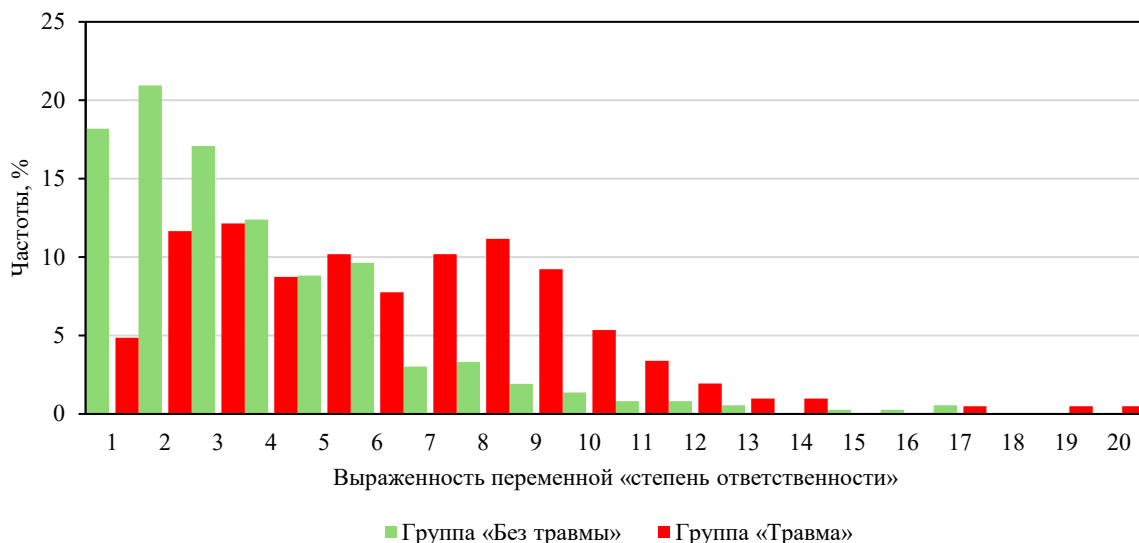


Рис. 1. Выраженность переменной «степень ответственности» в исследуемых группах



Рис. 2. Выраженность переменной «эмоциональность» в исследуемых группах

По рис. 1 и 2 мы видим, что происходит в группе «Без травмы»: с ростом качественной выраженности признаков ответственности и эмоциональности сокращаются относительные частоты выбора утверждений, выражающих низкую степень ответственности и эмоциональную неустойчивость. В группе «Травма» — иная картина. Максимумы сдвигаются в сторону больших значений переменных. Различие между группами статистически значимо ( $p < 0,05$ ).

Для социально-демографических показателей не выявили статистически значимую разницу по группирующему признаку «травма» ( $p > 0,05$ ) (таблица 4).

Таблица 4

Оценка различий между группами по социально-демографическим показателям

Переменная	Группа	Средний ранг	Величина критерия	Значимость критерия
Возраст	Без травмы (n = 363)	285,15	0,001	0,973
	Травма (n = 206)	284,73		
Образование	Без травмы (n = 363)	287,58	0,304	0,581
	Травма (n = 206)	280,46		
Стаж работы на данном предприятии	Без травмы (n = 363)	281,51	0,502	0,479
	Травма (n = 206)	291,16		
Общий стаж работы	Без травмы (n = 363)	281,65	0,482	0,488
	Травма (n = 206)	290,90		
Профессия	Без травмы (n = 363)	283,25	0,165	0,684
	Травма (n = 206)	288,02		

В таблице 5 обобщены итоги исследования взаимосвязи между независимыми переменными и зависимой переменной «травма».

Таблица 5

Анализ взаимосвязи независимых переменных и зависимой переменной «травма»

Парные переменные	Хи-квадрат Пирсона	Асимптотическая значимость (двусторонняя)	Значение гамма	Приблизительная значимость
<b>Степень ответственности — травма</b>	<b>78,704</b>	<b>0,000</b>	<b>0,514</b>	<b>0,000</b>
<b>Эмоциональность — травма</b>	<b>35,350</b>	<b>0,000</b>	<b>0,359</b>	<b>0,000</b>
Возраст — травма	4,386	0,223	-0,003	0,973
Образование — травма	0,535	0,765	-0,043	0,583
Стаж работы на данном предприятии — травма	0,526	0,913	0,049	0,478
Общий стаж работы — травма	1,868	0,600	0,049	0,493
Профессия — травма	0,166	0,684	0,037	0,406

Таблица 5 показывает статистическую значимость ( $p < 0,001$ ) критериев хи-квадрата Пирсона для парных переменных «степень ответственности» — «травма» и «эмоциональность» — «травма». Значит, очень мала вероятность отклонения нулевых гипотез о независимости указанных переменных при условии, что нулевые гипотезы верны. Таким образом, существуют статистически значимые взаимосвязи между анализируемыми переменными «степень ответственности» и «травма», а также «эмоциональность» и «травма».

Ранговый коэффициент корреляции гамма в таблицах сопряженности позволяет судить о силе и направлении выявленных взаимосвязей между переменными «степень ответственности» и «травма», а также «эмоциональность» и «травма». Этот коэффициент оценивает силу и направление связи, варьируя от -1 (сильная отрицательная связь) до +1 (сильная положительная связь). Ноль указывает на отсутствие связи. Между исследуемыми переменными выявлены средняя и слабая положительные статистически значимые взаимосвязи. Получили коэффициент гамма для двух групп переменных:

- 1) «степень ответственности» и «травма»;
- 2) «эмоциональность» и «травма».

Значения коэффициента равны 0,514 ( $p < 0,001$ ) и 0,359 ( $p < 0,001$ ) для первого и второго случаев соответственно.

Вместе с тем, согласно таблице 5, не выявлены статистически значимые ( $p > 0,05$ ) связи с зависимой переменной «травма» для переменных, определяющих социально-демографические показатели («возраст», «образование», «стаж работы на данном предприятии», «общий стаж работы», «профессия»).

Другой мерой связи для переменных, принадлежащих к номинальной и порядковой шкалам, является ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Значение -1 указывает на сильную отрицательную связь, +1 — на сильную положительную связь, ноль — на отсутствие связи.

Корреляции анализируемых переменных представлена в таблице 6.

Таблица 6

Корреляции независимых переменных и зависимой переменной «травма»

Парные переменные	Коэффициент Спирмена	Двусторонняя значимость
<b>Степень ответственности — травма</b>	<b>0,344</b>	<b>0,000</b>
<b>Эмоциональность — травма</b>	<b>0,242</b>	<b>0,000</b>
Возраст — травма	-0,001	0,973
Образование — травма	-0,023	0,582
Стаж работы на данном предприятии — травма	0,030	0,479
Общий стаж работы — травма	0,029	0,488
Профессия — травма	0,017	0,685

Обобщение данных в таблице 6 демонстрирует статистически значимые ( $p < 0,001$ ) слабые взаимосвязи между переменными «степень ответственности» и «травма», а также «эмоциональность» и «травма». Социально-демографические показатели не коррелируют с зависимой переменной «травма» ( $p > 0,05$ ).

**Обсуждение.** В производственной среде невозможно контролировать сразу весь персонал и влиять на каждое действие каждого сотрудника, поэтому поведение работника определяется его собственной ответственностью. Полученные данные подтверждают гипотезу о взаимосвязи реализованных опасных событий (производственный травматизм, профессиональное заболевание) с индивидуальными качествами работника:

- ответственностью как частью внутренней мотивации;
- эмоциональностью как частью темперамента.

Низкий уровень ответственности обуславливает небезопасное поведение работника (пренебрежение средствами индивидуальной защиты, поспешность, беспечность и пр.), что увеличивает профессиональные риски. Эмоциональная неустойчивость и импульсивность снижают концентрацию внимания в штатных и нештатных ситуациях.

Итоги данной научной работы согласуются с исследованиями роли персонала в обеспечении безопасности [4] и зависимости производственных травм от человеческого фактора [9].

В представленном исследовании математически доказана связь ответственности и эмоциональности с последствиями профессиональных рисков. Причем главную роль играют индивидуальные качества, а не социально-демографические показатели. Об этом говорит отсутствие статистически значимой связи возраста, стажа, образования и профессии с реализованными опасными событиями.

Работники с реализованными опасными событиями склонны выбирать больше утверждений, качественно характеризующих низкий уровень ответственности и эмоциональную неустойчивость. Этим они отличаются от работников без травм. Данный вывод обоснован более высокими медианами частот переменных «степень ответственности» и «эмоциональность» в группе «Травма», а также величинами средних рангов у работников с реализованными опасными событиями ( $p < 0,05$ ). Иными словами, потенциальные признаки более низкой степени ответственности и эмоциональной неустойчивости в этой группе качественно выражены сильнее, чем в группе работников без травм. Рис. 1 и 2 также подтверждают предположение об отличии индивидуальных качеств работников группы «Травма» ( $p < 0,05$ ). У них более выражены признаки низкой степени ответственности и эмоциональной неустойчивости.

Анализ таблиц сопряженности подтверждает наличие статистически обоснованной связи: уровень профессионального риска имеет тенденцию к росту при увеличении выраженности у респондентов качественных признаков эмоциональной неустойчивости и низкой степени ответственности.

Отдельного внимания заслуживает сравнение статистически значимых ранговых коэффициентов корреляции гамма (таблица 5) и Спирмена (таблица 6). Оба коэффициента положительны, что указывает на прямую зависимость между переменными: с увеличением ранга одной переменной, ранг другой также имеет тенденцию к увеличению. Разница значений коэффициентов гамма и Спирмена возникает из-за различий в алгоритмах их расчета. Рассмотрим коэффициенты корреляции Спирмена для пар переменных «степень ответственности» и «травма», а также «эмоциональность» и «травма». Они равны соответственно 0,344 и 0,242 ( $p < 0,001$ ), что свидетельствует о слабой положительной монотонной зависимости, которая не является идеально линейной в ранговом пространстве. Вместе с тем коэффициенты корреляции гамма для указанных переменных выше — соответственно 0,514 и 0,359 ( $p < 0,001$ ). То есть для переменных «степень ответственности» и «травма» выявлена более сильная связь, чем показывает коэффициент корреляции Спирмена. Таким образом, в сравнении с коэффициентом Спирмена коэффициент гамма лучше улавливает нелинейные монотонные тренды и показывает более существенную монотонную связь средней силы.

При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать некоторые ограничения работы. Дело в том, что ответы выражают субъективное мнение респондентов. Вместе с тем любой социологический опрос строится на допущении о выражении субъективного мнения.

**Заключение.** Установлено, что ответственность и эмоциональность — статистически значимые детерминанты реализации опасных событий на производстве ( $p < 0,05$ ). Вместе с тем не обнаружена значимая связь ( $p > 0,05$ ) между реализованными опасными событиями и такими характеристиками респондентов, как возраст, стаж, образование, профессия. Таким образом, можно утверждать, что индивидуальные качества влияют на реализацию рисков, а социально-демографические — нет.

В данном случае наличие или отсутствие корреляции выявили с помощью специально разработанного опросника (альфа Кронбаха 0,923).

Результаты исследования практически применимы для совершенствования систем управления охраной труда, в частности при профессиональном отборе соискателей на замещение вакантных рабочих мест.

В перспективе на базе представленного исследования можно выстроить персонифицированную (адресную) работу с сотрудниками и в зависимости от их индивидуальных качеств прогнозировать реализацию опасных событий.

**Список литературы / References**

1. Благовещенский Ю.Н. *Тайны корреляционных связей в статистике*. Москва: Научная книга; 2008. 158 с.  
Blagoveshchenskii YuN. *Secrets of Correlation Relationships in Statistics*. Moscow: Nauchnaya kniga; 2008. 158 p. (In Russ.)
2. Туманов М.В., Гендлер С.Г., Кабанов Е.И., Родионов В.А., Прохорова Е.А. Индекс персонального риска как перспективный инструмент управления человеческим фактором в охране труда. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;6(1):230–247. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_230](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_230)  
Tumanov MV, Gendler SG, Kabanov EI, Rodionov VA, Prokhorova EA. Personal Risk Index as a Promising Management Tool for Human Factor in Labor Protection. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;6(1):230–247. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_230](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_230)
3. Klimecka-Tatar D, Ulewicz R, Ingaldi M. Minimizing Occupational Risk by Automation of the Special Processes — Based on Occupational Risk Assessment. *Procedia Computer Science*. 2023;217:1145–1152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.313>
4. Виноградова О.В. Роль персонала в обеспечении безопасности на угледобывающих предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;2(1):64–76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-64-76>  
Vinogradova OV. The Role of Personnel in Ensuring Safety at Coal Mining Enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;2(1):64–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-64-76>
5. Перятинский А.Ю., Ильина О.Ю. Связь мотивированности работников с уровнем безопасности труда на горнодобывающем предприятии. *Безопасность труда в промышленности*. 2024;12:67–71. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-12-67-71>  
Peryatinskiy AYu, Iilina OYu. The Relationships between Employees' Motivation and the Safety Level at a Mining Enterprise. *Occupational Safety in Industry*. 2024;12:67–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-12-67-71>
6. Артемьев В.Б., Ермак Г.П., Галкин В.А., Макаров А.М., Кравчук И.Л. Роль человеческого фактора в происхождении и предотвращении аварий и травм на горнодобывающих предприятиях. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;11:79–84. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-11-79-84>  
Artemiev BV, Ermak GP, Galkin VA, Makarov AM, Kravchuk IL. The Role of the Human Factor in the Origin and Prevention of Accidents and Injuries at the Mining Enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2022;11:79–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-11-79-84>
7. Aliabadi MM, Mohammadfam I, Khorshidikia S. Human Error Identification and Risk Assessment in Loading and Unloading of Petroleum Products by Road Trucks Using the SHERPA and Fuzzy Inference System Method. *Heliyon*. 2024;10(15):e34072. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34072>
8. Febriyanto K, Rachman A, Rachman FF. The Contribution of Human Error Related to Occupational Accident Among Traditional Divers. *Gaceta Sanitaria*. 2021;35(1):S27–S29. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.008>
9. Reyesa RM, de la Rivaa J, Maldonadob A, Woocaya A, de la O R. Association between Human Error and Occupational Accidents' Contributing Factors for Hand Injuries in the Automotive Manufacturing Industry. *Procedia Manufacturing*. 2015;3:6498–6504. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.936>
10. Бююль А., Цёфель П. *SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановления скрытых закономерностей*. Санкт-Петербург: ДиаСофтЮП; 2005. 608 с.  
Vyuyul' A, Tsefel' P. *SPSS: the Art of Information Processing. Analysis of Statistical Data and Recovery of Hidden Patterns*. St. Petersburg: DiaSoftUP; 2005. 608 p. (In Russ.)
11. Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*. Москва: Физматлит; 2012. 816 с.  
Kobzar' AI. *Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Researchers*. Moscow: Fizmatlit; 2012. 816 p. (In Russ.)

**Об авторах:**

**Надежда Михайловна Герасименко**, кандидат биологических наук, ведущий специалист по охране труда и окружающей среды ООО «Эксплон» (101000, Российская Федерация, г. Москва, Армянский пер., 9, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [gerasimenko\\_nadezhda\\_944@mail.ru](mailto:gerasimenko_nadezhda_944@mail.ru)

**Елена Витальевна Глебова**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Промышленная безопасность и охрана окружающей среды» Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 65, корп. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [elena.glebova50@mail.ru](mailto:elena.glebova50@mail.ru)

**Юрий Олегович Рогозин**, начальник отдела охраны труда ООО «Газпром трансгаз Сургут» (628412, Российская Федерация, ХМАО — Югра, г. Сургут, ул. Университетская, 1), [ORCID](#), [Yurogozin@mail.ru](mailto:Yurogozin@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Н.М. Герасименко:** создание и подготовка рукописи. Визуализация результатов исследования и полученных данных.

**Е.В. Глебова:** контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

**Ю.О. Рогозин:** осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

*About the Authors:*

**Nadezhda M. Gerasimenko**, Cand. Sci. (Biol.), Leading Occupational Health and Environmental Protection Specialist, EXPLON LLC (9, Armyansky Lane, building 1, Moscow, 101000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [gerasimenko\\_nadezhda\\_944@mail.ru](mailto:gerasimenko_nadezhda_944@mail.ru)

**Elena V. Glebova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Safety and Environmental Protection, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Ave., building 1, Moscow, 119991, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [elena.glebova50@mail.ru](mailto:elena.glebova50@mail.ru)

**Yuri O. Rogozin**, Head of the Occupational Health and Safety Department, Gazprom Transgaz Surgut LLC (1, Universitetskaya St., Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra Surgut, 628412, Russian Federation), [ORCID](#), [Yurogozin@mail.ru](mailto:Yurogozin@mail.ru)

*Claimed Contributorship:*

**NM Gerasimenko:** writing – original draft preparation, visualization.

**EV Glebova:** supervision.

**YuO Rogozin:** supervision.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 16.02.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 10.04.2026

**Принята к публикации / Accepted** 20.04.2026

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.4.08; 658.567.1

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

### Обоснование и выбор оптимальных вариантов функционирования системы обращения твердых коммунальных отходов для целей эффективной инсинерации



EDN: NHXXNS

Алкинани Фатима Дахил Саидхун

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

[ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

#### Аннотация

**Введение.** За последние десятилетия проблема обращения с бытовыми и промышленными отходами в России и мире приобрела повышенную значимость вследствие роста урбанизации, увеличения потребления и ограниченности полигонных площадей. Традиционная модель утилизации — захоронение на полигонах — сопровождается рисками для окружающей среды и общественного здоровья, а также характеризуется низким уровнем восстановления ресурсов. Развиваются альтернативные стратегии, среди которых ключевыми являются раздельный сбор и механико-биологическая обработка (МБО) отходов, а также термические методы утилизации. Обзор литературы показывает, что зарубежные исследования (Европа, Япония) демонстрируют положительный эффект от комбинации раздельного сбора и МБО, а российские исследования акцентируют внимание на барьерах: недостаточной инфраструктуре для раздельного сбора, низком уровне общественного участия и финансовых ограничениях муниципалитетов. Анализ указывает на важность интегрированного подхода, где технологические решения сопровождаются организационными мерами и экономическими стимулами. В настоящее время отсутствуют комплексные оценки внедрения МБО с учётом разных сценариев раздельного сбора и локальной логистики. Существующие исследования часто ограничены технико-технологическими аспектами или представляют расчёты на уровне отдельных пилотных объектов, без оценки системных экономических последствий и детального анализа чувствительности ключевых параметров. Поэтому целью данной работы является определение оптимальных вариантов сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

**Материалы и методы.** Осуществлен сбор и анализ статистических данных о функционировании системы обращения ТКО на региональном уровне. В качестве источников использовалась открытая информация Федеральной службы государственной статистики и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Форма 2-ТП (отходы))<sup>1</sup>. Были изучены и проанализированы данные и отчеты IFC (International Finance Corporation)<sup>2</sup> и публичной правовой компании «Российский экологический оператор» (РЭО)<sup>3</sup>. Для решения поставленных задач был разработан алгоритм проведения исследований, включающий применение регрессионного анализа, построение ранжированного ряда удельной теплоты сгорания ТКО по морфологическому составу с последующим разделением на группы I и II, формирование альтернативных вариантов сортировки отходов за счет изменения доли групп ТКО (I и II) в условно принятых сценариях с последующим решением многокритериальной задачи выбора оптимального варианта сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации. Исследования проводились в программах MS Excel и Statistica.

**Результаты исследования.** Анализ статистических данных системы обращения и состава твердых коммунальных отходов позволил выявить, что морфологический состав для целей дальнейшей инсинерации за последние 5 лет оставался относительно стабильным с незначительными сезонными колебаниями. Наблюдалась четкая корреляция между численностью населения и объемами накопления отходов, а также между объемом отходов и уровнем их сортировки. В результате имитационного моделирования допустимого множества альтернативных

<sup>1</sup> Открытые данные. Росприроднадзор. URL: <https://rpn.gov.ru/opendata/> (дата обращения 05.03.2026).

<sup>2</sup> THE WORLD BANK GROUP ANNUAL REPORT 2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/about/annual-report/world-bank-group-downloads> (дата обращения 05.03.2026).

<sup>3</sup> Российский экологический оператор. URL: <https://reo.ru/about#docs> (дата обращения 05.03.2026).

© Алкинани Фатима Дахил Саидхун, 2026

вариантов сортировки ТКО был определен оптимальный баланс между экономической эффективностью от инсинерации и экологическим загрязнением окружающей среды. В такой постановке были имитационно сформированы партии для последующего сжигания с различным соотношением в них твердых коммунальных отходов из групп I и II в соотношении 10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10, соответственно. Определены оптимальные варианты сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации посредством расчета функции, определяющей степень приближения каждой из рассматриваемых альтернатив сортировки к идеальному значению (идеальной точке), в качестве которой были использованы значения минимальных выбросов (летучая зола, оксид серы, оксид азота, оксид углерода) и максимальное значение теплоты сгорания (энергетическая ценность ТКО исходя из морфологического состава), а также рассчитаны коэффициенты чувствительности к изменению базовых значений параметров сортировки и валового выброса загрязняющих веществ. Получены оптимальные варианты сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. показателей углеродного следа).

**Обсуждение.** Основным результатом исследования является разработанный подход к эффективной сортировке твердых коммунальных отходов (ТКО) для целей их последующей термической утилизации. В основу решения поставленной задачи положены принципы, обеспечивающие получение классического решения прямой и двойственной задач оптимизации, направленных на достижение максимальной эффективности процесса инсинерации ТКО при условии минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Полученные результаты позволяют осуществить эффективное разделение ТКО с учетом ограничивающих производственных факторов мусоросжигательных заводов на полигонах. Анализ морфологического состава ТКО для целей их последующей сортировки и термической утилизации позволил выявить варианты разделения отходов, обладающие наибольшей энергетической ценностью исходя из теплоты сгорания отдельных компонентов и характеризующиеся минимальным количеством выбросов загрязняющих веществ.

**Заключение.** Проведенный анализ статистических данных системы обращения ТКО позволил выявить преобладание полигонного захоронения и низкую результативность процесса сортировки. Регрессионные модели обнаружили возрастающие тенденции объемов вывозимых и отсортированных отходов, что предопределило необходимость целенаправленного и рационального разделения для целей утилизации. Имитационное моделирование альтернативных вариантов сортировки ТКО и решение оптимизационной задачи позволили определить наилучшие схемы распределения отходов для последующей термической переработки, характеризующиеся минимальными выбросами загрязняющих веществ и максимальными значениями теплоты сгорания. Таким образом, в ходе исследований получены оптимальные варианты сортировки твердых коммунальных отходов на основе учета морфологического состава партий, обеспечивающие наибольшую эффективность термической утилизации и минимизацию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

**Ключевые слова:** твердые коммунальные отходы, сортировка отходов, инсинерация, морфологический состав, теплота сгорания, выбросы загрязняющих веществ, механико-биологическая обработка, термическая утилизация, оптимизация, регрессионный анализ

**Благодарности.** Автор статьи благодарна заведующему кафедрой «Безопасность и экология горного производства» НИТУ «МИСИС» Коликову Константину Сергеевичу за неоценимую помощь, всестороннюю поддержку и плодотворное сотрудничество при написании основных положений данной работы, а также редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по редактированию статьи.

**Для цитирования.** Алкинани Фатима Дахил Саидхуд. Обоснование и выбор оптимальных вариантов функционирования системы обращения твердых коммунальных отходов для целей эффективной инсинерации. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):107–118. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

*Original Theoretical Research*

## Justification and Selection of Optimal Options for the Operation of Municipal Solid Waste Management System in Order to Ensure Effective Incineration

Fatimah Dakhil Saihood Alkinani  

National University of Science and Technology MISIS Moscow, Russian Federation

 [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

### Abstract

**Introduction.** Over the past decades, the issue of household and industrial waste management in Russia and worldwide has gained increased importance due to growing urbanization, increased consumption, and limited landfill space. The traditional disposal model — landfilling — is associated with environmental and public health risks and low levels of resource recovery. Alternative strategies are being developed, among which the key ones are separate collection and mechanical-biological treatment (MBT), as well as thermal disposal methods. A literature review shows that

international studies (Europe, Japan) demonstrate the positive effects of a combination of separate collection and MBT, while Russian studies emphasize the barriers: insufficient infrastructure for separate collection, low public participation, and municipal financial constraints. The analysis highlights the importance of an integrated approach, where technological solutions are accompanied by organizational measures and economic incentives. Currently, there is a lack of comprehensive assessments of the MTB implementation, taking into account various separate collection and local logistics scenarios. Existing studies are often limited to technical and technological aspects or present calculations at the level of individual pilot sites, without assessing the systemic economic impacts or providing a detailed sensitivity analysis of key parameters. Therefore, the aim of this study is to identify optimal MSW sorting options for subsequent incineration, based on combustion heat and pollutant emissions.

**Materials and Methods.** The author collected and analyzed statistical data on the functioning of the MSW management system at the regional level using publicly available information from the Federal State Statistics Service and the Federal Service for Supervision of Natural Resources (Form 2-TP (waste)) as sources. Data and reports from IFC (International Finance Corporation) and the public legal company Russian Environmental Operator (REO) were studied and analyzed. To achieve the set goals, the author has developed a research algorithm, including the use of regression analysis, the construction of a ranked series of the specific heat of MSW combustion by morphological composition with subsequent division into groups I and II, the formation of alternative waste sorting options by changing the proportion of MSW groups (I and II) in the conditionally accepted scenarios, followed by solving a multi-criteria problem of choosing the optimal option for MSW sorting for the purposes of further incineration. The research was conducted in MS Excel and Statistica software.

**Results.** An analysis of statistical data on the solid municipal waste management system and composition revealed that the morphological composition for the purposes of further incineration remained relatively stable over the past 5 years with minor seasonal fluctuations. A clear correlation was observed between population size and waste accumulation volume, as well as between waste volume and the level of waste sorting. Simulation modeling of a feasible set of alternative MSW sorting options made it possible to determine the optimal balance between the economic efficiency of incineration and environmental pollution. In this setting, batches were simulated for subsequent incineration with different ratios of solid municipal waste from groups I and II in the ratio of 10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10, respectively. Optimal options for MSW sorting for further incineration were determined by calculating a function that determined the degree of approximation of each of the sorting alternatives under consideration to the ideal value (ideal point), which was based on the values of minimum emissions (fly ash, sulfur oxide, nitrogen oxide, carbon monoxide) and the maximum value of the calorific value (the energy value of MSW based on the morphological composition). The sensitivity coefficients to changes in the basic values of the sorting parameters and the gross emission of pollutants were calculated. Optimal options for MSW sorting from the perspective of further incineration were obtained based on the calculation of combustion heat and pollutant emissions (including carbon footprint indicators).

**Discussion.** The main result of the study is a developed approach to the efficient sorting of municipal solid waste for subsequent thermal recycling. The solution to this problem was based on principles that allowed for a classical solution to the direct and dual problem of achieving maximum efficiency from the municipal solid waste incineration process while minimizing the negative impact on the environment. The obtained results will enable the effective separation and sorting of municipal solid waste despite the production constraints of incineration plants at municipal solid waste landfills. The analysis of the morphological composition of municipal solid waste for subsequent sorting and thermal recycling made it possible to identify waste separation options with the highest energy value based on heat of combustion of individual components and characterized by a minimum amount of pollutant emissions.

**Conclusion.** The analysis of statistical data from the municipal solid waste management system revealed the prevalence of landfill disposal and the ineffectiveness of the sorting process. Regression models revealed increasing trends in the volume of waste removed and sorted, necessitating further targeted and effective sorting for recycling purposes. Simulation modeling of alternative MSW sorting options and the solution of an optimization problem made it possible to identify effective MSW sorting options for further thermal disposal, with minimal pollutant emissions and maximum combustion heat values. In conclusion, during the research, optimal options for municipal solid waste sorting were obtained based on the morphological composition of batches for maximum efficiency of thermal disposal and minimum emissions of pollutants into the atmosphere.

**Keywords:** municipal solid waste, waste sorting, incineration, morphological composition, combustion heat, pollutant emissions, mechanical and biological treatment, thermal utilization, optimization, regression analysis

**Acknowledgements.** The author is grateful to Konstantin Sergeevich Kolikov, Head of the Department of Safety and Ecology of Mining Production at NUST MISIS, for his invaluable help, comprehensive support, and fruitful cooperation in writing the main provisions of this work. The author would also like to thank the Editorial board of the Journal and the reviewer for their professional analysis and their recommendations for improving the article.

**For Citation.** Fatimah Dakhil Saihood Alkinani. Justification and Selection of Optimal Options for the Operation of Municipal Solid Waste Management System in Order to Ensure Effective Incineration. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):107–118. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

**Введение.** В современном мире процесс урбанизации населения происходит высокими темпами. По данным ООН на 2024 год уровень урбанизации Европы составил 75,8 %, Северной Америки (США и Канада) — 83,4 %, России — 75 %<sup>4</sup>. Рост городского населения России, согласно Росстату за период 2000–2024 годов, составил 25 %, что однозначно свидетельствует о смещении образа жизни населения в сторону городских агломераций<sup>5</sup>. Современные условия урбанизации, обеспечивая комфорт проживания и формируя возрастающие потребности городского населения, всё чаще требуют соблюдения принципов рационального обращения с образующимися в ходе жизнедеятельности человека твердыми коммунальными отходами — их значительное накопление и недостаточная утилизация способствуют стремительному ухудшению экологической обстановки.

Под твердыми коммунальными отходами (ТКО) понимают отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в ходе использования физическими лицами в жилых помещениях для удовлетворения личных и бытовых нужд<sup>6</sup>. В странах ЕС и США доля захоронений не превышает 40 %, а уровень переработки достигает 60 %. Ведущими странами ЕС в сфере переработки отходов являются государства Скандинавии, Нидерланды, Германия и Бельгия — утилизация достигает 50–68 %, при этом захоронение составляет лишь 1 %<sup>7</sup>.

Выбор конкретного способа утилизации ТКО в разных странах определяется особенностями экономического развития, государственной политикой в области раздельного сбора отходов, а также площадью территории государства и плотностью его населения. Основными общепринятыми видами утилизации ТКО являются: полигонное захоронение, биологическая утилизация и сжигание (инсинерация).

Согласно данным Росстата<sup>8</sup> и Росприроднадзора<sup>9</sup> в России на полигонное захоронение направляется в среднем 82 % от общего объёма ТКО. За последние 5 лет доля отсортированных отходов выросла до рекордной отметки и составляет 53 %. Однако следует отметить, что основная масса этих отходов всё равно подвергается захоронению. Приведённые цифры ясно демонстрируют отставание процессов утилизации ТКО в России по сравнению с ведущими мировыми практиками. Следовательно, разработка эффективной системы обращения с ТКО представляет собой важную задачу федерального уровня, что подтверждено отраслевым документом «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления в России на период до 2030 года»<sup>10</sup>, целью которого является создание эффективной отрасли переработки отходов.

На сегодняшний день теоретические и практические вопросы, связанные с эффективным обращением с ТКО и рассматриваемые в открытой литературе, развиваются в нескольких основных направлениях. Одно из них связано с построением технико-экономической системы обращения с ТКО [1] и созданием организационно-логистической цепочки — от сбора и первичной сортировки отходов в городской агломерации, через транспортировку и вторичную сортировку в специальных сортировочных комплексах до последующей утилизации [2]. В указанных исследованиях основной упор делается на первичную сортировку и своевременный вывоз мусора. Для плотнонаселённых агломераций развитие этого направления остаётся актуальной практической задачей. Несмотря на принимаемые меры по сортировке, они практически не влияют на уменьшение как легальных, так и нелегальных полигонов захоронения отходов [3].

Другое направление направлено на разработку и внедрение технологий переработки ТКО с целью получения вторичного сырья (ткани, строительные материалы и т. п.) и вторичной энергии — альтернативного топлива с высокой теплотой сгорания [4], рассматриваемого как энергоноситель [5]. Наиболее распространённым и технически отработанным методом промышленной переработки ТКО для получения вторичной энергии является сжигание [6]. Основным преимуществом термической переработки отходов является относительно малое воздействие на земельные и водные ресурсы, тогда как основными недостатками являются загрязнение атмосферы

<sup>4</sup> Исследование «Рейтинг стран мира по уровню урбанизации». United National. URL: <http://www.un.org/en/desa> (дата обращения 25.01.2026).

<sup>5</sup> Доля городского населения в общей численности населения на 1 января. ЕМИСС Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36057> (дата обращения 28.01.2026).

<sup>6</sup> Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения 01.10.2025).

<sup>7</sup> Sustainable waste management: what the EU is doing. URL: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/eu-waste-management-infographic-with-facts-and-figures> (accessed: 29.09.2025).

<sup>8</sup> Коммунальные отходы. ЕМИСС Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=коммунальные+отходы> (дата обращения 11.09.2025).

<sup>9</sup> Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения 17.09.2025).

<sup>10</sup> Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-п. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71767672/> (дата обращения 21.01.2026).

сферы значительными объёмами отходящих газов и летучей золы [7], а также негативное влияние выбросов на биоразнообразие. В контексте проблемы сжигания мусора [8] в литературе преимущественно рассматривается строительство мусоросжигательных заводов [9]. Лишь немногие авторы учитывают специфику эффективности инсинерации с учётом морфологического состава ТКО [10]. В то же время недостаточно изучена нестабильность морфологического состава ТКО и взаимосвязь между эффективной сортировкой и последующими вариантами утилизации, включая термическую.

Цель работы — определение оптимальных вариантов сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учёта теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

Исходя из поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- сбор и анализ статистических данных системы обращения и состава ТКО;
- моделирование регрессионных взаимосвязей между объёмами вывозимых и отсортированных отходов и численностью населения;
- имитационное моделирование допустимого множества альтернативных вариантов сортировки ТКО;
- определение оптимальных вариантов сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации.

**Материалы и методы.** В рамках поставленных задач был осуществлён сбор и анализ статистических данных и функционирования системы обращения ТКО на региональном уровне. В качестве источников использовалась открытая информация Федеральной службы государственной статистики и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. Были изучены и проанализированы данные и отчеты IFC (International Finance Corporation)<sup>11</sup> и публичной правовой компании «Российский экологический оператор» (РЭО)<sup>12</sup>, а также материалы, полученные другими авторами при исследовании в южных [11] и центральных [12] регионах России.

В рамках поставленных задач данного исследования были реализованы следующие процедуры:

- получены зависимости объемов вывозимых и отсортированных отходов от суммарного количества собираемых отходов и численности населения;
- сформировано исходное множество альтернативных вариантов сортировки ТКО в зависимости от их морфологического состава, рассчитаны объёмы выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа) для различной производительности установок инсинерации;
- осуществлён поиск оптимальной альтернативы сортировки ТКО по сформированному множеству оценочных критериев энергетической ценности и количеству выбросов загрязняющих веществ при инсинерации методом идеальной точки.

Основная последовательность проведения исследований заключалась в следующих действиях:

1. На основе регрессионного анализа значений сформированной статистической выборки были получены регрессионные зависимости объема отходов от численности населения и объема отсортированных отходов от суммарного объема собираемых отходов. Полученные модели проверены на адекватность и статистическую значимость с использованием коэффициентов корреляции ( $R^2 > 0,75$ ), Стьюдента и F-критерия Фишера ( $p > 0,95$ ).

2. На основе использования справочной информации был сформирован ранжированный ряд удельной теплоты сгорания ТКО по морфологическому составу, определенному в рамках сбора статистических данных. Проранжированные значения были разделены на две основные группы: I — теплота сгорания  $22–45 \times 10^3$  кДж/кг; II — теплота сгорания  $17–21 \times 10^3$  кДж/кг (рис. 1).

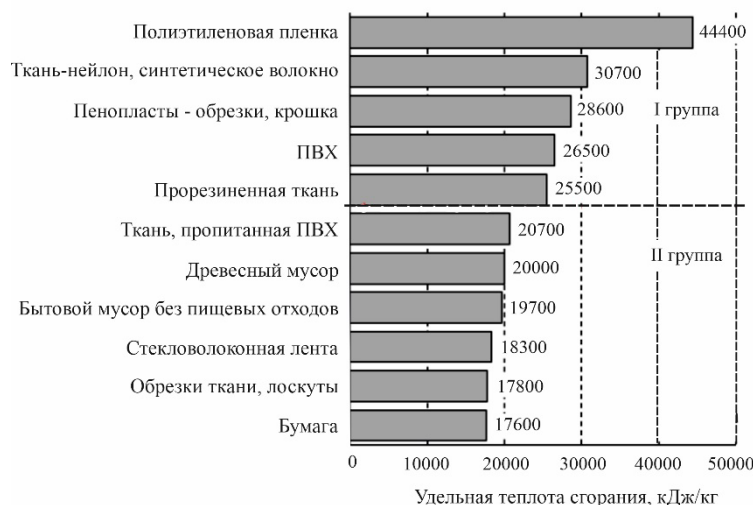


Рис. 1. Удельная теплота сгорания при сжигании ТКО (по морфологическому составу), кДж/кг

<sup>11</sup> Russia Waste Management Market Size and Share Analysis. URL: <https://www.nextmsc.com/report/russia-waste-management-market> (accessed: 26.01.2026)

<sup>12</sup> Российский экологический оператор. URL: <https://reo.ru/about#docs> (дата обращения 05.03.2026).

В такой постановке сжигание всего объема собираемых отходов зачастую является нецелесообразным и неэффективным, поскольку, наряду с экономической выгодой от получаемой энергии, возникает серьезная проблема загрязнения окружающей среды продуктами горения [13].

3. С целью оценки предпочтительности многоальтернативного выбора вариантов сортировки ТКО было сформировано исходное множество критериев оценки выбросов/сбросов загрязняющих веществ, основанное на идее выявления структуры предпочтений вариантов сортировки твердых коммунальных отходов [14]. В качестве альтернативных вариантов сортировки в задаче выбора выступало последовательное изменение доли групп ТКО (I и II группы) соответственно в условно принятых соотношениях (10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10).

4. Решена многокритериальная задача выбора оптимального варианта сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации. Одним из подходов, позволяющих решить данную задачу, является метод построения функций ценности [15], а поиск наилучшей альтернативы осуществлялся на основе метода «идеальной» точки. Функция ценности определяет степень приближения полученного решения к идеальной точке, в качестве координат которой может быть использованы максимальные (минимальные) значения отдельных критериев, т.е. наилучшие значения. Как правило, полученные значения критериев нормируются к единице по следующей формуле (1):

$$Z_{i\text{норм}} = (Z_i - Z_{i\text{мин}}) / (Z_{i\text{макс}} - Z_{i\text{мин}}), \quad (1)$$

где  $Z_{i\text{норм}}$  — нормированное значение критерия  $Z_i$ ;  $Z_{i\text{мин}}$ ,  $Z_{i\text{макс}}$  — максимальное и минимальное значения  $i$ -го критерия соответственно.

Моделирование осуществлялось для определенного морфологического состава твердых коммунальных отходов, в отношении которого были разработаны варианты сортировки и утилизации (инсинерации), характеризующиеся максимальной энергетической ценностью (получение электроэнергии) исходя из теплоты сгорания отдельных компонентов и минимальным объемом выбросов загрязняющих веществ (в т. ч. углеродным следом (парниковые газы)) (таблица 1).

Таблица 1

Формирование исходного множества альтернатив сортировки и оценочных критериев выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа) и инсинерации ТКО (базовая производительность установки 0,5 тонн/ч)

Варианты сортировки ТКО (групп I / группа II), %	Критерии оценки выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа (парниковые газы)) и эффективности инсинерации				
	Теплота сгорания (энергетическая ценность ТКО (по морфологическому составу сортировки))* (кДж/кг)	Валовый выброс загрязняющих веществ (кг/ч) / (т/год)			
		Летучая зола	Оксид серы (SO <sub>2</sub> )	Оксид азота (N <sub>2</sub> O)	Оксид углерода (CO <sub>2</sub> )
Вар. 1 (10/90)	4033	0,05/0,30	0,07/0,36	0,18/1,03	0,40/2,23
Вар. 2 (30/70)	5782	0,14/0,76	0,11/0,59	0,41/2,42	0,79/4,43
Вар. 3 (50/50)	8532	0,22/1,22	0,15/0,82	0,64/3,60	1,18/6,63
Вар. 4 (70/30)	11282	0,30/1,68	0,19/1,05	0,87/4,88	1,57/8,83
Вар. 5 (90/10)	14031	0,39/2,14	0,23/1,28	1,10/6,17	1,96/11,03

*Примечание:* \* Расчет производился исходя из элементарного состава компонентов в рабочей массе твердых коммунальных отходов, выхода летучих веществ, процентного содержания компонента и низшей теплоты сгорания компонентов.

Исследование проводилось в программах MS Excel и Statistica (модули анализ данных и регрессионного анализа).

**Результаты исследования.** Согласно статистическим данным выявлено, что морфологический состав ТКО за последние 5 лет оставался относительно стабильным с незначительными сезонными колебаниями и включал в себя (приведены данные среднего и стандартного отклонения): органических отходов — 49,3±5,4 %; вторичных отходов (пластик — 10,2±2,1 %, бумага — 10,2±5,3 %, металлы — 10,2±3,1 %, стекло — 8,1±2,2 %, другие отходы — 12±4 %). При этом наблюдалась четкая корреляция между численностью населения (ЧН) и объемами накопления отходов (ООт). На основании метода наименьших квадратов, используя данные собранной статистики, была получена зависимость (ООт = 442ln (ЧН) — 5585,5, R<sup>2</sup> = 0,67) с последующим расчетом коэффициента парной корреляции (рис. 2).

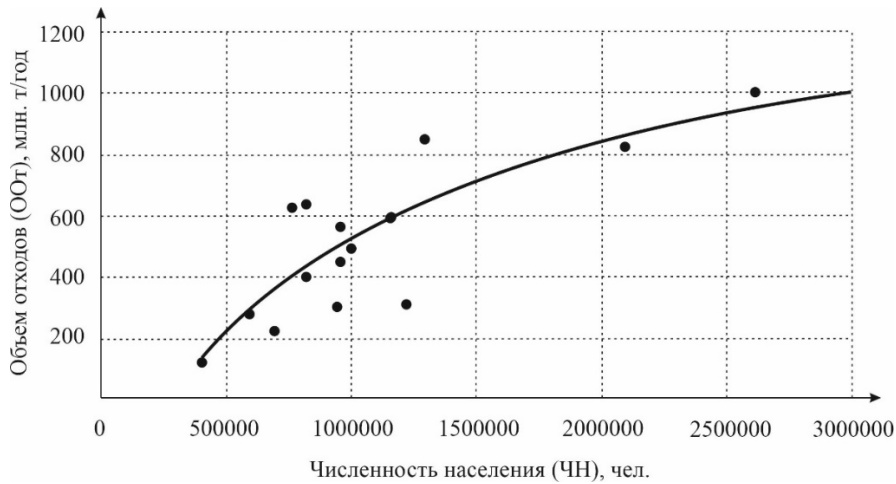


Рис. 2. Зависимость объема вывозимых отходов (ООт, млн. т/год) от численности населения (ЧН, чел.)

Кроме того, на полигонах ТКО была выявлена ещё одна проблема, связанная с процессом сортировки отходов. Проведённый анализ показал, что при объёмах собираемых отходов (СО), превышающих 600 тыс. тонн, количество отсортированных отходов (ОО) практически не изменяется ( $((OO) = 37484(CO)^{0.2062}; R^2 = 0,79)$ ), что, в свою очередь, отражается на показателях эффективности дальнейшей утилизации и рециклинга (рис. 3). Данный вывод дополнительно подтверждает целесообразность и актуальность выполненных прикладных исследований, связанных с анализом системы обращения ТКО, структурной сортировкой по морфологическому составу и адаптивным формированием мусоропотоков.

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее распространённых методов промышленной переработки отходов является инсинерация, а базовым показателем её эффективности считается количество получаемой в результате сжигания энергии, характеризуемое удельной теплотой сгорания того или иного вида ТКО [16].

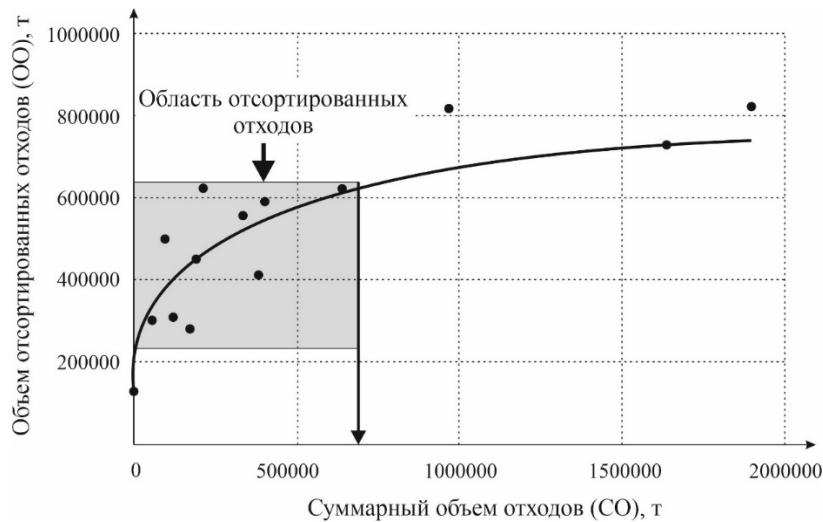


Рис. 3. Зависимость объема отсортированных отходов (ОО, т) от суммарного количества собираемых отходов (СО, т)

В ходе проведённых исследований был выполнен расчёт функции, определяющей степень приближения каждой из рассматриваемых альтернатив сортировки к идеальному значению (идеальной точке). В качестве такого значения использовались минимальные показатели выбросов (летучая зола, оксид серы, оксид азота, оксид углерода), а также максимальная величина теплоты сгорания (энергетическая ценность ТКО, определяемая исходя из морфологического состава). При вычислении расстояния до идеальной точки вес (значимость) каждого из оценочных критериев принимался равнозначным. При необходимости модель может быть дополнена экспертно-моделирующими процедурами, устанавливающими весовые коэффициенты для специфических задач сортировки и инсинерации. В область оптимальных альтернатив по данному методу вошли варианты 3–5 (рис. 4). Ввиду наличия разноразмерных величин предварительно осуществлялась процедура нормировки и расчёт коэффициентов чувствительности модели множественной линейной регрессии — функции теплоты сгорания ТКО при инсинерации от показателей выбросов загрязняющих веществ (таблица 2).

Таблица 2

Функции коэффициентов чувствительности модели эффективности инсинерации (теплоты сгорания (ТСг)) ТКО к изменению значений параметров сортировки и валового выброса загрязняющих веществ

Параметр	Коэффициент чувствительности соотношения ТСг/ X				
	Вар.1 (10/90)	Вар.2 (30/70)	Вар. 3* (50/50)	Вар.4* (70/30)	Вар.5* (90/10)
X					
Летучая зола	1681,31	2141,82	2981,76	3167,61	3998,43
Оксид серы (SO <sub>2</sub> )	2619,16	4314,19	5514,26	6412,13	7571,51
Оксид азота (N <sub>2</sub> O)	8314,19	9368,14	11365,91	13591,21	15910,12
Оксид углерода (CO <sub>2</sub> )	1323,12	1436,84	1509,43	1609,19	1943,18
Сводный член	1423,12	1556,81	1919,35	2193,45	3005,45
Коэффициент корреляции	0,79	0,89	0,82	0,76	0,81

Примечание: \* Оптимальные варианты сортировки ТКО (по данным таблицы 1).

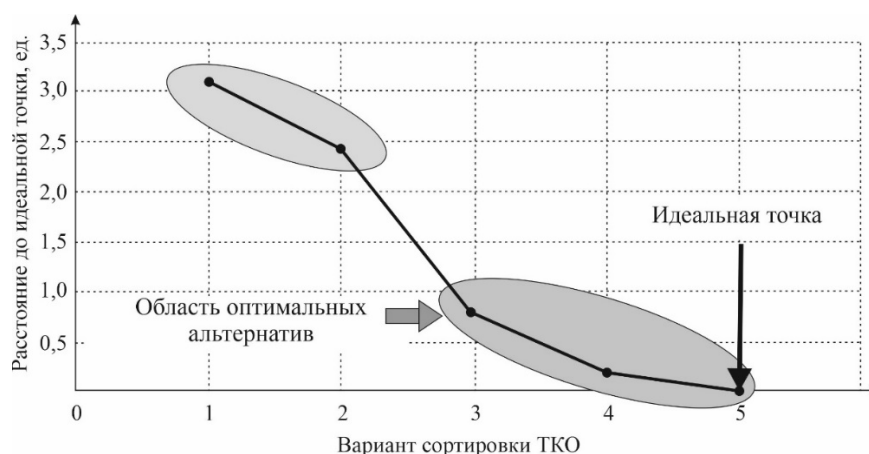


Рис. 4. Определение степени приближения полученных решений вариантов сортировки ТКО к идеальной точке

Таким образом, в ходе проведённых исследований были получены оптимальные варианты сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учёта теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ (в том числе показателей углеродного следа).

Для формирования совокупности параметров модели эффективности инсинерации, подлежащих, согласно исходной постановке, варьированию по результатам предполагаемой сортировки с учётом морфологического состава ТКО, помимо коэффициентов чувствительности, определены статистические характеристики вариации и корреляции. На основе анализа полученных коэффициентов чувствительности модели эффективности инсинерации ТКО установлены максимально возможные абсолютные значения указанных коэффициентов и сформулированы выводы о необходимости учёта при сортировке ТКО тех структурных элементов морфологического состава, сжигание которых обеспечит наименьшие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

**Обсуждение.** Полученные в ходе исследования результаты позволяют сформулировать ряд важных положений, касающихся оптимизации процесса сортировки ТКО для целей инсинерации.

Выявленная логарифмическая зависимость между численностью населения и объемом вывозимых отходов ( $R^2 = 0,67$ ) согласуется с результатами исследований других авторов при исследовании в южных [11] и центральных [12] регионах России, в которых также отмечался нелинейный характер накопления ТКО в урбанизированных территориях. Полученный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии устойчивой связи, однако значение  $R^2 < 0,7$  указывает на влияние дополнительных факторов (уровень потребления, сезонность, экономическая активность), не учтенных в модели. Это ограничение требует в дальнейших исследованиях расширения набора переменных для повышения точности прогнозирования объемов образования ТКО.

Особый интерес представляет обнаруженная степенная зависимость объема отсортированных отходов от суммарного количества собираемых ( $R^2 = 0,79$ ), демонстрирующая эффект насыщения при превышении порога в 600 тыс. тонн. Данный результат объясняется ограниченной пропускной способностью существующих сортировочных комплексов и недостаточным развитием инфраструктуры переработки в регионах с высоким уровнем образования отходов. Похожие выводы были сделаны в работе [17], где авторы указывали на технологические и организационные барьеры масштабирования процессов сортировки. Выявленное ограничение подчеркивает необходимость не только наращивания мощностей сортировочных станций, но и внедрения системы раздельного сбора на уровне первичных источников образования ТКО.

Относительная стабильность морфологического состава ТКО за пятилетний период (органические отходы —  $49,3 \pm 5,4$  %; вторичные материалы — около 50 %) соответствует общемировым тенденциям для стран с развивающейся системой обращения с отходами [5]. Преобладание органической фракции характерно для регионов с невысоким уровнем раздельного сбора, что отличает российскую практику от стран Скандинавии и Западной Европы, где доля органики снижена до 20–30 % благодаря активному компостированию и биологической переработке [11]. Это различие объясняет более низкую среднюю теплоту сгорания российских ТКО по сравнению с европейскими аналогами.

Применение метода идеальной точки для многокритериального выбора оптимальных вариантов сортировки представляет собой адаптацию классического подхода теории принятия решений к специфической задаче управления отходами. Полученные оптимальные варианты (соотношения I/II группы: 50/50, 70/30, 90/10) демонстрируют компромисс между максимизацией энергетической ценности (теплота сгорания от 8532 до 14031 кДж/кг) и минимизацией экологического ущерба от выбросов. Важно отметить, что увеличение доли высококалорийных фракций (I группа) приводит к пропорциональному росту валовых выбросов загрязняющих веществ — летучей золы с 0,22 до 0,39 кг/ч; SO<sub>2</sub> с 0,15 до 0,23 кг/ч; N<sub>2</sub>O с 0,64 до 1,10 кг/ч и CO<sub>2</sub> с 1,18 до 1,96 кг/ч. Это согласуется с фундаментальными закономерностями термической переработки, описанными в работах Хантимирова [6], Коновалова [7], Вайтикунене [13] и других авторов, где показано, что материалы с высокой теплотой сгорания (пластик, резина) генерируют больше токсичных продуктов горения.

Расчитанные коэффициенты чувствительности модели (таблица 2) позволяют количественно оценить влияние каждого типа выбросов на энергетическую эффективность инсинерации. Наибольшую чувствительность теплота сгорания демонстрирует к изменению выбросов оксида азота (коэффициенты от 8314,19 до 15910,12), что объясняется спецификой окислительных процессов при высокотемпературном горении азотсодержащих компонентов ТКО. Полученные значения коэффициентов корреляции моделей (0,76–0,89) свидетельствуют о достаточной надежности регрессионных зависимостей, хотя вариант 4 показал относительно более низкое значение (0,76), что может указывать на нелинейные эффекты при данном соотношении компонентов.

Принятое в исследовании допущение о равнозначности весовых коэффициентов всех оценочных критериев является упрощением, которое может быть оправдано на начальном этапе анализа, но требует уточнения для конкретных практических задач. В зависимости от региональных экологических приоритетов и нормативов качества атмосферного воздуха может потребоваться дифференцированный подход к учету различных видов выбросов. Например, в городских агломерациях с напряженной экологической обстановкой критерий выбросов CO<sub>2</sub> (углеродный след) может иметь больший вес в связи с климатическими обязательствами России.

Ограничением представленной модели является базовая производительность установки инсинерации (0,5 т/ч), которая характерна для малых и средних мусоросжигательных комплексов. При масштабировании на крупные заводы (производительность 10–50 т/ч) потребуются корректировка параметров выбросов с учетом эффекта масштаба и применения современных систем газоочистки. Кроме того, в модели не учтены экономические аспекты сортировки и инсинерации — капитальные и операционные затраты, стоимость электроэнергии, что ограничивает возможности практического применения результатов без дополнительного технико-экономического обоснования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при планировании и оптимизации системы обращения с ТКО на региональном уровне. Определенные оптимальные варианты сортировки могут служить целевыми ориентирами для операторов по обращению с отходами при формировании технических заданий для сортировочных комплексов и согласовании мусоропотоков между сортировочными станциями и мусоросжигательными заводами. Расчитанные коэффициенты чувствительности позволяют оперативно оценивать изменение экологических и энергетических показателей при корректировке морфологического состава сортируемых ТКО.

Сравнение полученных результатов с международной практикой показывает, что предложенный подход соответствует тенденциям интеграции экологических критериев в процесс управления отходами [8]. Однако для достижения показателей ведущих европейских стран (утилизация 50–68 %, захоронение 1 %) необходима комплексная трансформация всей системы обращения с ТКО, включающая не только оптимизацию сортировки для инсинерации, но и развитие альтернативных методов переработки — компостирования органики, рециклинга вторичных материалов, производства RDF-топлива.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку динамических моделей, учитывающих сезонную изменчивость морфологического состава ТКО, а также на интеграцию экспертных оценок для определения весовых коэффициентов критериев в зависимости от региональной специфики. Перспективным направлением является создание цифровых платформ для мониторинга и управления мусоропотоками в режиме реального времени с использованием полученных регрессионных зависимостей и оптимизационных моделей.

**Заключение.** В ходе выполнения работы достигнута поставленная цель — определены оптимальные варианты сортировки твердых коммунальных отходов для целей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

Решены следующие задачи:

1. Собраны и проанализированы статистические данные системы обращения с ТКО, установлена относительная стабильность морфологического состава отходов за пятилетний период (органические — 49,3±5,4 %, вторичные материалы — около 50 %).

2. Получены регрессионные зависимости объема вывозимых отходов от численности населения (логарифмическая,  $R^2 = 0,67$ ) и объема отсортированных отходов от суммарного количества собираемых (степенная,  $R^2 = 0,79$ ), выявлен эффект насыщения сортировочных мощностей при объемах свыше 600 тыс. тонн.

3. Сформировано множество из пяти альтернативных вариантов сортировки ТКО по соотношению групп с различной теплотой сгорания (I группа:  $22-45 \times 10^3$  кДж/кг; II группа:  $17-21 \times 10^3$  кДж/кг), рассчитаны объемы выбросов загрязняющих веществ (летучая зола, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) для каждого варианта при базовой производительности установки 0,5 т/ч.

4. С применением метода идеальной точки определены три оптимальных варианта сортировки ТКО (соотношения групп I/II: 50/50, 70/30, 90/10), обеспечивающие компромисс между максимизацией энергетической ценности (теплота сгорания 8 532–14 031 кДж/кг) и минимизацией экологического воздействия.

Рассчитаны коэффициенты чувствительности модели эффективности инсинерации, показывающие наибольшее влияние выбросов оксида азота на энергетические характеристики процесса. Полученные регрессионные модели обладают достаточной статистической значимостью (коэффициенты корреляции 0,76–0,89).

Результаты исследования могут быть использованы региональными операторами по обращению с отходами при планировании работы сортировочных комплексов и мусоросжигательных заводов, а также при формировании стратегий развития инфраструктуры переработки ТКО в соответствии с целями «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов до 2030 года»<sup>13</sup>.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку динамических моделей с учетом сезонной изменчивости состава ТКО, внедрение экспертных процедур определения весовых коэффициентов критериев и технико-экономическое обоснование полученных вариантов сортировки для различных масштабов производства.

#### Список литературы / References

1. Цыпкин Ю.А., Близнюкова Т.В., Фомин А.А., Феклистова И.С., Орлов С.В. Эффективная структура системы обращения с твердыми коммунальными отходами городских агломераций. *International Agricultural Journal*. 2020;5:13–27. <http://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10208>

Tsyarkin YuA, Bliznukova TV, Fomin AA, Feklistova IS, Orlov SV. Effective Structure of the Municipal Solid Waste Management System in Urban Agglomerations. *International Agricultural Journal*. 2020;5:13–27. (In Russ.) <http://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10208>

2. Олифиренко А.В., Бобренко Е.Г. Анализ системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Омской области. *Экологические чтения 2025 Материалы XVI Национальной научно-практической конференции (с международным участием)*. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина; 2025. С. 386–390.

Olifirenko AV, Bobrenko EG. Analysis of the Municipal Solid Waste Management System in the Omsk Region. In: *Ecological Readings 2025. Proc. XV National Scientific and Practical Conference (with International Participation)*. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; 2025. P. 386–390. (In Russ.)

3. Ильяшова Ю.А., Батавина М.А. Создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Курской области: проблемы и перспективы. *Политика, экономика и инновации*. 2023;1:1–8.

Ilyashova YuA, Batavina MA. Creation of a Sustainable Solid Municipal Waste Management System in the Kursk Region: Problems and Prospects. *Management, Economics and Innovation*. 2023;1:1–8. (In Russ.)

4. Краснопева Н.А., Еремина Е.А., Ермоленко Б.В. Использование основных видов твердых коммунальных отходов в качестве вторичного сырья для производства продукции товарного вида как способ решения проблемы накопления отходов. *Успехи в химии и химической технологии*. 2021;247(12):84–86.

Krasnopeeva NA, Eremina EA, Ermolenko BV. The Use of the Main Types of Solid Municipal Waste as Secondary Raw Materials for the Production of Marketable Products as a Way to Solve the Problem of Waste Accumulation. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2021;247(12):84–86. (In Russ.)

<sup>13</sup> Правительство Российской Федерации, распоряжение. URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf> (дата обращения 15.02.2026).

5. Малистина А.Л., Еремина Е.А., Ермоленко Б.В. Некоторые подходы к анализу использования полимерных отходов в качестве вторичного сырья. *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;261(12):59–62.
- Malistina AL, Eremina EA, Ermolenko BV. Analysis of the Use of Polymer Waste as Secondary Raw Materials. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022;261(12):59–62. (In Russ.)
6. Хантимирова С. Б., Мишустин О.А., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф. Анализ и обоснование выбора способа переработки отходов производства и потребления. *Инженерный вестник Дона*. 2019;52(1).
- Khantimirova SB, Mishustin OA, Gracheva NV, Zheltobryukhov VF. Analysis and Justification of the Choice of Method of Processing Waste Production and Consumption. *Engineering Bulletin of the Don*. 2019;52(1). (In Russ.)
7. Коновалова Ю.Б., Черкашина М.П. Воздействие на земельные ресурсы и почвенный покров загрязняющих веществ полигона ТКО. *Сборник трудов конференции «Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок (Самара-2022)»*. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Омега Сайнс»; 2025. С.188–190.
- Konovalova YuB, Cherkashina MP. Impact of Pollutants from MSW Landfill on Land Resources and Soil Cover. In: *Proceedings of the Conference “Materials and Methods of Innovative Scientific and Practical Research and Development (Samara-2022)”*. Ufa: Omega Sciences Limited Liability Company; 2025. P. 188–190. (In Russ.)
8. Седаш Т.Н. Зарубежная и российская практика использования механизмов финансирования в системе твердых коммунальных отходов. *Экономика. Налоги. Право*. 2021;14(2):109–118.
- Sedash TN. Foreign and Russian Practice of Using Financing Mechanisms in the Municipal Solid Waste System. *Economics, Taxes & Law*. 2021;14(2):109–118. (In Russ.)
9. Шубов Л.Я., Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Оптимизация процессов управления твердыми бытовыми отходами как единая технологическая и экономическая система. *Вестник ассоциации туризма и сервиса*. 2009;4:24–32.
- Shubov LYa, Doronkina IG, Borisova ON. Economic Aspects of Service and Management of Municipal Waste. *Universities for Tourism and Service Association Bulletin*. 2009;4:24–32. (In Russ.)
10. Сивков Ю.В., Шкилева А.А. *Управление твердыми коммунальными отходами*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. 160 с.
- Sivkov YuV, Shkileva AA. *Solid Municipal Waste Management*. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2022. 160 p. (In Russ.)
11. Абрамов В.Н. Результаты исследований морфологического состава твердых коммунальных отходов жилого фонда в южных регионах России. *Отходы и ресурсы*. 2023;10(4). <https://doi.org/10.15862/19INOR423>
- Abramov VN. Results of Research on the Morphological Composition of Solid Municipal Waste in Residential Buildings in Southern Regions of Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023;10(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/19INOR423>
12. Абрамов В.Н. Результаты исследований морфологического состава твердых коммунальных отходов жилого фонда в центральных регионах России. *Отходы и ресурсы*. 2024;11(1). <https://doi.org/10.15862/07INOR124>
- Abramov VN. Results of Research on the Morphological Composition of Solid Municipal Waste in Residential Buildings in Southern Regions of Russia. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2024;11(1). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/07INOR124>
13. Вайतिकунене Е.Л., Пинчук И.А., Семенова Е.И. Имитационное моделирование как инструмент поддержки принятия управленческих решений. *Наука и бизнес: пути развития*. 2023;148(10):8–10.
- Vaitikunene EL, Pinchuk IA, Semenova EI. Simulation Modeling as a Tool to Support Management Decision Making. *Science and Business: Ways of Development*. 2023;148(10):8–10. (In Russ.)
14. Ratković B, Dimitrijević B, Popović D, Bjelić N. Bi-Objective Approach for Designing a Regional Waste Management System: A Case Study of Vojvodina (Serbia). *Waste Management & Research*. 2022;41(2):303–311. <http://doi.org/10.1177/0734242X221105446>
15. Покровская Н.Н., Молодкова Э.Б., Снисаренко С.О., Онуфриева А.М. Экономические факторы социально-экологической повестки в концепции ESG. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*. 2022;12(2):22–34. <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-2-22-34>
- Pokrovskaja NN, Molodkova EB, Snisarenko SO, Onufrieva AM. Economic Factors of the Socio-Environmental Agenda in the ESG Concept. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management*. 2022;12(2):22–34. (In Russ.) <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-2-22-34>

16. Бартнев О.А. Возобновляемая энергетика на производственных и бытовых отходах. *Управление техносферой*. 2021;4(3):378–388. <http://doi.org/10.34828/UdSU.2021.91.82.004>

Bartnev OA, Lipaev AA. Renewable Energy in Industrial and Household Waste. *Upravlenie Tekhnosferoi*. 2021;4(3):378–388. (In Russ.) <http://doi.org/10.34828/UdSU.2021.91.82.004>

17. Троянская М.А., Симонова Е.Д. Мониторинг системы обращения с твердыми коммунальными отходами. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;4:337–343.

Troyanskaya M.A., Simonova E.D. Monitoring sistemy obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2023;4:337–343.

**Об авторе:**

**Алкинани Фатима Дахил Саидхуд**, аспирант кафедры «Безопасность и экология горного производства» Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1), [ORCID](https://orcid.org/), [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**About the Author:**

**Fatimah Dakhil Saihood Alkinani**, Postgraduate Student of the Department of Safety and Ecology of Mining Production, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Avenue, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/), [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

*The author has read and approved the final version of manuscript.*

**Поступила в редакцию / Received** 06.03.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 27.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 03.04.2026

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.05/.06

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

### Исследование воздействия на здоровье человека и окружающую среду качества воды, поступающей в центральные системы водоснабжения



EDN: GHCRVH

К.Д. Мишина , О.Е. Безбородова ✉, Н.В. Камардина 

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация

✉ [oxana243@yandex.ru](mailto:oxana243@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Обеспечение населения безопасной питьевой водой является одной из ключевых задач охраны здоровья и устойчивого развития, поскольку её качество напрямую влияет на уровень заболеваемости и смертности. По данным ООН и ВОЗ, недостаточная эффективность систем водоподготовки способствует возникновению и распространению инфекционных заболеваний, приводящих к гибели в мире до 1,4 миллиона человек ежегодно. Вместе с тем остаётся недостаточно разработанным вопрос комплексной сравнительной оценки технологий водоподготовки с точки зрения совокупного риска для здоровья населения, учитывающей одновременно химические и микробиологические факторы опасности. Указанный пробел в научном знании обуславливает необходимость исследований, ориентированных не только на достижение нормативных показателей качества воды, но и на интегральную оценку последствий применения различных технологических схем для здоровья человека. В связи с этим целью настоящего исследования является сравнительная оценка эффективности технологий водоподготовки питьевой воды централизованных систем водоснабжения по совокупному риску для здоровья населения, что позволит обосновать выбор оптимальных решений в практике водоподготовки.

**Материалы и методы.** Информационную базу исследования составили действующие нормативные документы, устанавливающие требования к качеству питьевой воды и технологическим процессам ее подготовки; «Методика разработки реестра НДТ систем водоснабжения и водоотведения»<sup>1</sup>; российские и международные стандарты и руководства по оценке риска для здоровья населения; научные статьи и монографии по технологиям фильтрации, коагулирования, осветления, сорбции, окисления и обеззараживания воды. Оценка качества исходной воды выполнялась по основным группам показателей: органолептическим, обобщенным, санитарно-микробиологическим, паразитологическим, а также санитарно-химическим. Для количественной оценки и сравнения различных схем водоподготовки применялись методы математического моделирования и статистической обработки данных. Расчет выполнялся в соответствии с подходами, изложенными в МР 2.1.4.0289–22<sup>2</sup>. На основе классификации источников водоснабжения по качеству воды анализировались рекомендуемые совокупности технологических операций:

- для первого класса — предварительное фильтрование с возможной реагентной обработкой и обязательным обеззараживанием;
- для второго класса — фильтрование (при наличии фитопланктона – микрофильтрование) с коагулированием, отстаиванием и последующим обеззараживанием;
- для третьего класса — добавление второй ступени очистки, включающей осветление, окисление, сорбцию и повторное обеззараживание.

Исследование выполнено с использованием стандартных методик лабораторного анализа качества воды и специализированного программного обеспечения для моделирования и оценки риска.

<sup>1</sup> «Методика разработки реестра наилучших доступных технологий (НДТ) систем водоснабжения и водоотведения», раздел 1 «Водоснабжение», договор №34/08/13 от 18.12.2013 г., том 1, URL: [http://nghp-sro.ru/files/news/news137/1\\_SRO\\_04-471.pdf](http://nghp-sro.ru/files/news/news137/1_SRO_04-471.pdf) (дата обращения 01.04.2026)

<sup>2</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://cepportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

© Мишина К.Д., Безбородова О.Е., Камардина Н.В., 2026

**Результаты исследования.** Проведена оценка эффективности действующей технологии (механическая очистка, коагуляция, хлорирование) и предложенной многоступенчатой схемы (включающей ультрафильтрацию, сорбцию и комбинированное обеззараживание). Выполнено математическое моделирование изменения параметров качества воды для трёх сценариев водоподготовки. С использованием специального программного обеспечения проведён модельный эксперимент и оценка изменения качества по четырём группам параметров (органолептические, обобщённые, санитарно-микробиологические и паразитологические, санитарно-химические). По МР 2.1.4.0289–22<sup>3</sup> рассчитаны значения совокупного риска и эффективность его снижения в результате водоподготовки; результаты статистически обработаны. На основе данных санитарно-гигиенического мониторинга и расчёта совокупного риска для здоровья населения показано, что исходная вода имеет превышения по ряду показателей. Установлено, что предложенный многоступенчатый метод обеспечивает более глубокую очистку и значительно эффективнее снижает негативное влияние на здоровье по всем группам параметров (органолептическим, обобщённым, санитарно-микробиологическим и санитарно-химическим).

**Обсуждение.** Проведенный сравнительный анализ эффективности двух методов водоподготовки показал значительное преимущество многоступенчатой схемы очистки. Предложенный комплексный подход полностью обеспечил соответствие качества воды нормативным требованиям по предельно-допустимым значениям за счет сочетания ультрафильтрации, сорбции и комбинированного обеззараживания. Метод многоступенчатой схемы очистки обеспечил не только полную микробиологическую и химическую безопасность, но и высокие органолептические показатели воды, повышая общую надежность системы водоснабжения.

**Заключение.** В работе проведена сравнительная оценка эффективности двух технологий водоподготовки для централизованной системы водоснабжения г. Пензы. На основе методики расчета совокупного риска для здоровья населения было установлено, что исходная вода из Сурского водохранилища обладает высоким уровнем риска. Показано, что существующий метод очистки (коагуляция и хлорирование) снижает риск до средней эффективности, оставляя систему водоснабжения уязвимой. В свою очередь, предложенный многоступенчатый метод (ультрафильтрация, сорбция, УФ-обеззараживание и хлораминирование) продемонстрировал очень высокую эффективность (82 %), снизив совокупный риск до пренебрежимо малого значения. Результаты доказывают преимущество многоступенчатого подхода и могут служить основанием для модернизации систем водоподготовки с целью повышения их надежности и безопасности для населения.

**Ключевые слова:** окружающая среда, здоровье человека, центральное водоснабжение, методы очистки природных вод

**Для цитирования.** Мишина К.Д., Безбородова О.Е., Камардина Н.В. Исследование воздействия на окружающую среду и здоровье человека качества воды, поступающей в центральные системы водоснабжения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):119–131. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

Original Empirical Research

## Investigation of the Impact of Water Quality in Central Water Supply Systems on Human Health and the Environment

Kristina D. Mishina , Oksana E. Bezborodova ✉, Natalya V. Kamardina 

Penza State University, Penza, Russian Federation

✉ [oxana243@yandex.ru](mailto:oxana243@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** Providing safe drinking water to the population is a crucial task for health protection and sustainable development, as its quality directly influences the level of morbidity and mortality. The UN and WHO have stated that insufficient efficiency of water treatment systems contribute to the emergence and spread of infectious diseases, causing up to 1.4 million deaths worldwide each year. At the same time, the issue of comprehensive comparative assessment of water treatment technologies in terms of the overall risk to public health remains underdeveloped, considering both chemical and microbiological hazards. This gap in scientific knowledge necessitates research that focuses not only on meeting water quality standards but also on an integrated assessment of the effects of various technological schemes on human health. In this study, we aim to conduct a comparative assessment of the effectiveness of drinking water treatment technologies used in centralized water supply systems in terms of the overall risk to public health. This will make it possible to choose the best solution for water treatment in practice.

<sup>3</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

**Materials and Methods.** The information base for the study consisted of current regulatory documents that establish requirements for drinking water quality and technological processes for its preparation, such as the “Methodology for developing a register of BAT for water supply and sanitation systems”; Russian and international standards, and guidelines for assessing public health risks, scientific articles and monographs on filtration, coagulation, clarification, sorption, oxidation, and disinfection of water. The assessment of source water quality was conducted according to the main groups of indicators: organoleptic, generalized, sanitary-microbiological, parasitological, as well as sanitary-chemical. Mathematical modeling and statistical data processing methods were used to quantify and compare different water treatment schemes. The calculation was performed in accordance with the approaches described in MR 2.1.4.0289–22.

Based on the classification of water supply sources by water quality, we analyzed the recommended sets of technological operations:

- for the first class — pre-filtration with optional reagent treatment and mandatory disinfection;
- for the second class — filtration (in the presence of phytoplankton, microfiltration) with coagulation, settling and subsequent disinfection;
- for the third class — additional stage of purification including clarification, oxidation, sorption and repeated disinfection.

The study was performed using standard methods of laboratory analysis of water quality and specialized software for modeling and risk assessment.

**Results.** The effectiveness of the current treatment technology (mechanical purification, coagulation, and chlorination) and the proposed multistage scheme (including ultrafiltration, sorption, and combined disinfection) were evaluated. Mathematical modeling of changes in water quality parameters for three scenarios of water treatment was performed. Using special software, a model experiment and an assessment of quality changes were conducted for four groups of parameters (organoleptic, generalized, sanitary-microbiological and parasitological, and sanitary-chemical). According to MR 2.1.4.0289–22, the values of integrated risk and the effectiveness of its reduction as a result of water treatment were calculated. The results were statistically processed. Based on the data on sanitary and hygienic monitoring and calculation of the overall risk to public health, the source water was found to have excesses in several indicators. It was established that the proposed multi-stage method provided more thorough purification and significantly reduced the negative impact on health across all groups of parameters (organoleptic, generalized, sanitary-microbiological and sanitary-chemical).

**Discussion.** A comparative analysis of the effectiveness of the two water treatment methods revealed a significant advantage of the multi-stage purification process. The proposed integrated approach fully ensured that water quality met the regulatory requirements for maximum permissible values through a combination of ultrafiltration, sorption and combined disinfection. The multi-stage purification scheme ensured not only complete microbiological and chemical safety, but also high organoleptic water parameters, enhancing the overall reliability of the water supply system.

**Conclusion.** The paper provides a comparative assessment of the effectiveness of two water treatment technologies for the centralized water supply system in Penza. Based on the methodology for calculating the overall risk to public health, it was found that the source water from the Surskoye reservoir had a high risk level. The current purification method (coagulation and chlorination) has been shown to reduce the risk to an average level, leaving the water supply system vulnerable. In contrast, the proposed multi-stage method (ultrafiltration, sorption, UV disinfection, and chloroamination) demonstrated very high efficiency (82%) in reducing the cumulative risk to negligible value. These results support the advantages of a multi-stage approach and can serve as a foundation for upgrading water treatment systems to increase their reliability and safety for the public.

**Keywords:** environment, human health, central water supply, natural water purification methods

**For Citation.** Mishina KD, Bezborodova OE, Kamardina NV. Investigation of the Impact of Water Quality in Central Water Supply Systems on Human Health and the Environment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):119–131. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

**Введение.** Обеспечение населения качественной питьевой водой представляет собой проблему планетарного масштаба. Данная проблема обусловлена комплексом факторов, ключевым из которых является доступ к источникам природной воды надлежащего качества. Однако ввиду глобального техногенного воздействия на окружающую среду следует отметить, что природных источников, вода из которых пригодна для питья без предварительной очистки, фактически не существует. Качественный и количественный состав воды в природных источниках питьевого водоснабжения выступает важным фактором, определяющим состояние окружающей среды и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения. Согласно данным исследования специального комитета ООН, бремя болезней человека во многом определяется качеством воды, забираемой из при-

родных источников для питьевых целей. С развитием городских территорий и промышленных агломераций возрастает техногенная нагрузка на водные объекты, что приводит к их загрязнению [1]. В связи с этим на первый план выходят технологии водоподготовки, выбор которых должен быть обоснован с учётом санитарно-гигиенических, экологических, технологических и экономических параметров.

Документы всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и национальные нормативные документы РФ устанавливают стандарты качества питьевой воды, направленные на обеспечение безопасности и сохранение здоровья человека. Согласно рекомендациям ВОЗ, качество водоподготовки оценивается по следующим группам факторов: микробиологическим, химическим, радиологическим и сенсорным (в российской терминологии — органолептическим). ВОЗ также подчеркивает значимость мониторинга и регулярной проверки качества воды на всех этапах цепочки поставок — от источника до конечного потребителя. Такой подход гарантирует своевременное выявление отклонений и принятие соответствующих мер, что способствует снижению рисков для здоровья населения и поддержанию общественного благополучия.

Недостаточный уровень водоподготовки влечет за собой возникновение и распространение инфекционных заболеваний (холера, дизентерия, брюшной тиф, гепатит А, полиомиелит) [2], смертность от которых в мире достигает 1,4 миллиона человек в год [3]. Длительное потребление питьевой воды, содержащей химические загрязняющие вещества в концентрациях, превышающих предельно допустимые (ПДК), приводит к развитию патологий органов пищеварения [4], мочевыделительной [5], эндокринной [6] и сердечно-сосудистой систем: нарушению работы сердечной мышцы [7], гипертонии и повышенному кровяному давлению [8], ишемической кардиомиопатии [9]. Кроме того, высокое содержание нитратов в воде приводит к возникновению рака желудка [10]. Присутствие тяжелых металлов вызывает неврологические заболевания у детей: свинец — поражение головного мозга и центральной нервной системы [11], ртуть — нарушение концентрации, потерю памяти, повреждение нервов [12] и рак кожи, отмечают отечественные [13] и зарубежные [14] исследователи. Повышенная жесткость воды способствует накоплению солей в организме человека, что вызывает заболевания суставов и мочекаменную болезнь [15].

В связи с этим совершенствование технологий водоподготовки и водоочистки, а также систем контроля параметров природной и питьевой воды приобретает первостепенное значение. Это требует обоснованного выбора данных технологий и определения совокупности параметров для их сравнительной оценки. Методические рекомендации МР 2.1.4.0289–22<sup>4</sup> предлагают методику для оценки эффективности мероприятий, направленных на повышение качества питьевой воды в централизованных системах водоснабжения. Сравнительная оценка проводится по таким параметрам, как потенциальный риск для здоровья человека и эффективность водоподготовки.

Несмотря на наличие утвержденных методик оценки риска для здоровья населения от качества питьевой воды, большинство существующих исследований концентрируются на анализе отдельных загрязнителей или оценке эффективности конкретного этапа очистки. Комплексная сравнительная оценка различных технологий водоподготовки на основе показателя совокупного риска для здоровья человека в городе Пенза не проводилась. Такой фрагментарный подход не позволяет в полной мере установить, какая из комбинаций методов очистки является наиболее оптимальной для снижения общего количества болезней, связанного с потреблением воды из конкретного источника. Настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела путем системного анализа и сопоставления альтернативных сценариев очистки воды для условий города Пензы.

Одним из природных источников воды для обеспечения центрального водоснабжения г. Пенза является Сурское водохранилище. Согласно данным санитарно-гигиенического мониторинга и классификации природных вод по физико-химическим показателям качества воды, Сурское водохранилище относится к первому классу поверхностных источников [16]. Существующий метод водоподготовки для данного источника включает в себя механическую очистку воды с последующей коагуляцией и флокуляцией, а также проведением обеззараживания методом хлорирования. Согласно данной системе очистки происходит процеживание через фильтрационные решетки исходной природной воды и отстаивание ее в специальных отстойниках для удаления взвесей. После этого вводятся коагулянты, которые способствуют агрегации мелкодисперсных и коллоидных частиц в крупные хлопья, которые потом подвергаются фильтрации. Затем осуществляется обеззараживание воды методом хлорирования, для обеспечения ее бактериальной безопасности при поступлении в центральные системы водоснабжения.

<sup>4</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289–22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Недостатками такого процесса очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения, являются:

- образование большого объема шлама, который требует утилизации и при хранении оказывает негативное влияние на окружающую среду;
- риск для здоровья населения остаточного содержания алюминия в воде при возможном нарушении дозирования, что влечет за собой нанесение вреда здоровью человека;
- риск для здоровья населения неполного устранения патогенных вирусов и бактерий, что также способствует ухудшению здоровья населения.

Современные технологии водоподготовки основаны на комплексном подходе, реализуемом через многоступенчатую схему, в которой различные методы очистки взаимно дополняют друг друга, компенсируя недостатки каждого отдельного способа. Одна из таких технологий включает стадию предподготовки, направленную на подготовку воды к последующей глубокой очистке; стадию основной обработки, на которой удаляются тонкодисперсные и растворенные загрязнители; стадию обеззараживания, обеспечивающую микробиологическую безопасность воды, поступающей в центральные сети. Предподготовка заключается в механической фильтрации поверхностных вод через барабанные решетки, агрегации мельчайших частиц в крупные хлопья с последующим осаждением и физическим отделением образовавшихся агломератов от очищаемой воды. На данной стадии достигается снижение мутности и цветности, а также удаление до 90 % взвешенных веществ и коллоидных примесей.

Основную очистку осуществляют методами ультрафильтрации и сорбции, удаляя патогенные микроорганизмы, органические соединения, побочные продукты дезинфекции и вещества, вызывающие неприятный привкус и запах.

На стадии обеззараживания вода сначала проходит через камеры с ультрафиолетовым излучением для разрушения ДНК и РНК микроорганизмов, затем в неё дозируется небольшое количество хлорамина для полной дезинфекции, эффект которой сохраняется на протяжении всей распределительной сети. В результате получается вода, безопасная по микробиологическим и химическим показателям, обладающая отличными органолептическими свойствами, подача которой в сеть обеспечивается с минимальными рисками для здоровья потребителей.

На рис. 1 приведены алгоритмы методов очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения из Сурского водохранилища.

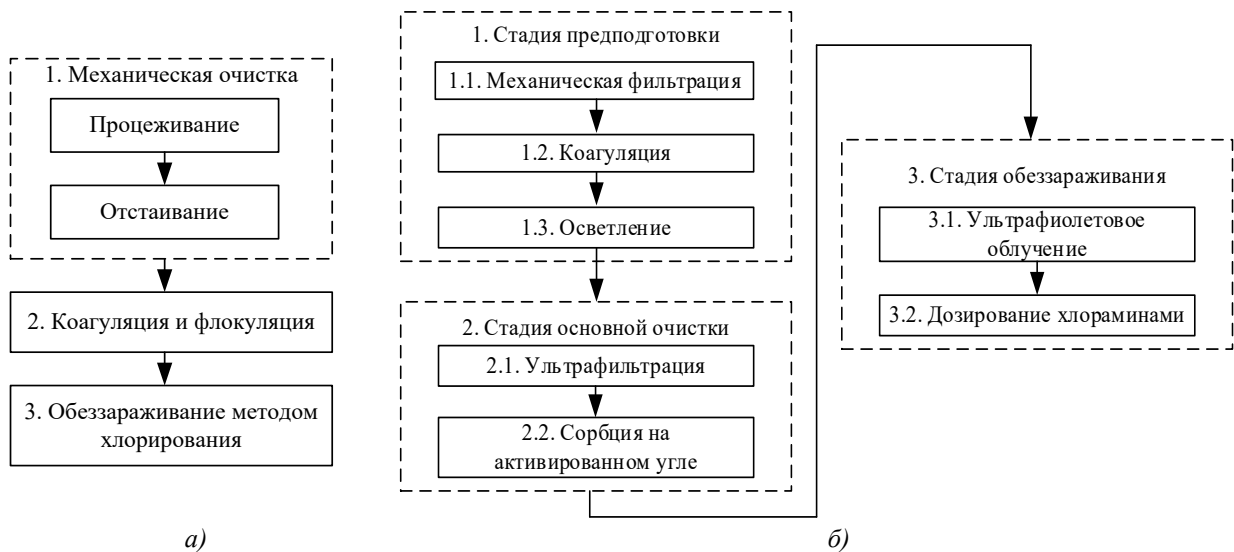


Рис. 1. Алгоритм процесса очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения: а — метод очистки воды № 1 [17]; б — метод очистки воды № 2 [18]

Для сравнения эффективности очистки представленных методов проведена оценка совокупного риска для здоровья населения и степени эффективности согласно МР 2.1.4.0289-22<sup>5</sup>. Для проведения исследования были выбраны контролируемые параметры, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека и в анализируемом водном объекте находятся в превышении предельно допустимых значений (ПДЗ) согласно следующим нормативам ГОСТ<sup>6</sup> и СанПиН<sup>7</sup>. Было проведено исследование проб воды до проведения очистки и после очистки по двум рассматриваемым методам.

<sup>5</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

<sup>6</sup> ГОСТ 31952–2012. «Устройства водоочистные. Общие требования к эффективности и методы ее определения». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293785/4293785990.pdf?ysclid=mnfyc28qpx343642988> (дата обращения 01.04.2026)

<sup>7</sup> СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: [https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat\\_files/174/2801/SP123685\\_21.pdf?ysclid=mnfyfca8xz794025561](https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mnfyfca8xz794025561) (дата обращения 01.04.2026)

Основная цель данного исследования — сравнительная оценка эффективности технологий водоподготовки питьевой воды централизованных систем водоснабжения по совокупному риску для здоровья человека.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- проведение анализа физико-химического и биологического состава воды из природных источников водоснабжения города Пензы с целью выявления наиболее значимых загрязнителей;
- расчет совокупного риска, формирующего бремя болезней, для различных сценариев водоподготовки;
- оценка степени эффективности очистки воды, поступающей в централизованные системы водоснабжения.

Новизна работы заключается в применении интегрального подхода, который позволяет не просто констатировать соответствие или несоответствие нормативам, а количественно оценить и сравнить конечный эффект от внедрения различных технологий с точки зрения предотвращения потенциального вреда для здоровья населения.

**Материалы и методы.** В ходе исследования был выполнен анализ научных публикаций, патентов и нормативных документов, содержащих информацию о составе, показателях и методах водоподготовки. Проведено математическое моделирование с последующей статистической обработкой его результатов. Изучено влияние состава питьевой воды на здоровье человека и качество окружающей среды.

Оценка состава питьевой воды осуществлялась по следующим группам показателей, регламентируемым российскими и международными нормативными документами: органолептическим, обобщенным, санитарно-микробиологическим, паразитологическим и санитарно-химическим.

В качестве критериев оценки качества питьевой воды использовались предельно допустимые значения (ПДЗ), которые установлены российскими нормативными документами. Исследование проводилось на базе Пензенского государственного университета.

Согласно МР 2.1.4.0289–22<sup>8</sup>, для оценки эффективности мероприятий по улучшению качества водоподготовки необходимо рассчитать средние значения по всем совокупностям фактических значений контролируемых параметров до ( $\bar{P}_{i,до}$ ) и после ( $\bar{P}_{i,после}$ ) водоподготовки:

$$\bar{P}_{i,до} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,до}}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{P}_{i,после} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,после}}{n}, \quad (2)$$

где  $P_{i,до}$ ,  $P_{i,после}$  — фактические значения контролируемых параметров до и после водоподготовки;  $n$  — количество отобранных проб.

Получив средние значения по всем совокупностям фактических значений контролируемых параметров до и после водоподготовки, определяли кратность превышения ПДЗ по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{P}_{i,до(после)}}{ПДЗ_i}. \quad (3)$$

Разделив диапазон изменений значений в соответствии с таблицей 1 для каждого из рассчитанных по формуле (3) значений, определяли функцию принадлежности к диапазону  $\mu(x)$ :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{НГ1} \leq x < x_{ВГ1} \\ \frac{x_i - x_{НГ2}}{x_{ВГ2} - x_{НГ2}}, & \text{если } x_{НГ2} \leq x < x_{ВГ2} \\ 1, & \text{если } x_{НГ3} \leq x < x_{ВГ3} \\ \frac{x_i - x_{НГ4}}{x_{ВГ4} - x_{НГ4}}, & \text{если } x_{НГ4} \leq x < x_{ВГ4} \\ 0, & \text{если } x \geq x_{НГ5} \end{cases}. \quad (4)$$

<sup>8</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Категории риска для здоровья населения

Характеристика		Категории риска для здоровья населения				
		1	2	3	4	5
Диапазон кратности превышения ПДЗ	$x_{НГ}$	0	0,5	1	2	5
	$x_{ВГ}$	0,5	1	2	5	$+\infty$
Ранг, $k$		1	2	3	4	5
Категория риска для здоровья		Пренебрежимо малый	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Риск для здоровья населения		$(0; 1 \cdot 10^{-8}]$	$(1 \cdot 10^{-8}; 1 \cdot 10^{-6}]$	$(1 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-4}]$	$(1 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-3}]$	$(1 \cdot 10^{-3}; 1]$

*Примечание:* НГ — нижняя граница интервала; ВГ – верхняя граница интервала; « ) » — обозначает, что значение не принадлежит данному интервалу; « ] » — обозначает, что значение принадлежит данному интервалу.

После этого проводили оценку риска для здоровья населения по всем контролируемым параметрам, объединенным в группы (санитарно-химическим). По полученным оценкам для каждого контролируемого параметра рассчитывали весовой коэффициент, устанавливающий связь параметра и класса болезней, определяемого загрязняющими веществами, присутствующими в воде. На следующем этапе исследования, используя принцип Фишберна, определяли, как часто встречался каждый класс болезней при оценке величины риска для здоровья населения по весовым коэффициентам ( $W$ ). При этом учитывали ранг риска здоровью ( $k$ ) и ранг класса болезни по степени ( $l$ ):

$$W = \frac{2 \cdot (k - l + 1)}{(k + 1) \cdot k}, \quad (5)$$

где  $k$  — ранг риска здоровью (таблица 1);  $l$  — ранг класса болезни по степени тяжести (приложение 2 к МР 2.1.4.0289-22 таблица П2<sup>9</sup>).

Далее для каждого  $i$ -го контролируемого показателя в каждой группе определяли весовые коэффициенты ( $G_i$ ):

$$G_i = \frac{1}{m}, \quad (6)$$

где  $m$  — количество всех рассматриваемых показателей в группе: для органолептических — 3, для обобщенных — 5, для санитарно-микробиологических и паразитологических — 6, для санитарно-химических — 9.

За этим последовал расчет совокупного вклада каждой из пяти групп контролируемых параметров ( $w_k$ ) в общую величину риска для здоровья населения:

$$w_k = \sum_i G_i \cdot \mu_{k,i}. \quad (7)$$

По формуле определяли риск для здоровья населения от воздействия каждой группы контролируемых параметров:

$$R_g = \sum_{k=1}^5 \bar{R}_k \cdot w_k, \quad (8)$$

где  $R_g$  — риск для здоровья населения от воздействия каждой группы контролируемых параметров;  $\bar{R}_k$  — среднее значение диапазона изменения величины риска для здоровья населения, возникающего в результате воздействия к  $k$ -той группе контролируемых параметров.

Совокупный риск рассчитывали для всех контролируемых параметров для двух ситуаций — до и после водоподготовки:

$$R = \frac{1}{V_g} \sum_{p=1}^5 R_g \cdot V_g, \quad (9)$$

где  $R$  — совокупный риск для здоровья населения;  $R_g$  — значение величины риска для здоровья населения для каждой группы контролируемых параметров;  $V_g$  — суммарный весовой коэффициент  $k$ -той группы контролируемых параметров при определении совокупного риска для здоровья населения;  $\bar{V}_g$  — средний весовой коэффициент  $k$ -той группы контролируемых параметров при определении совокупного риска для здоровья населения (рис. 2).

<sup>9</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://cepportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

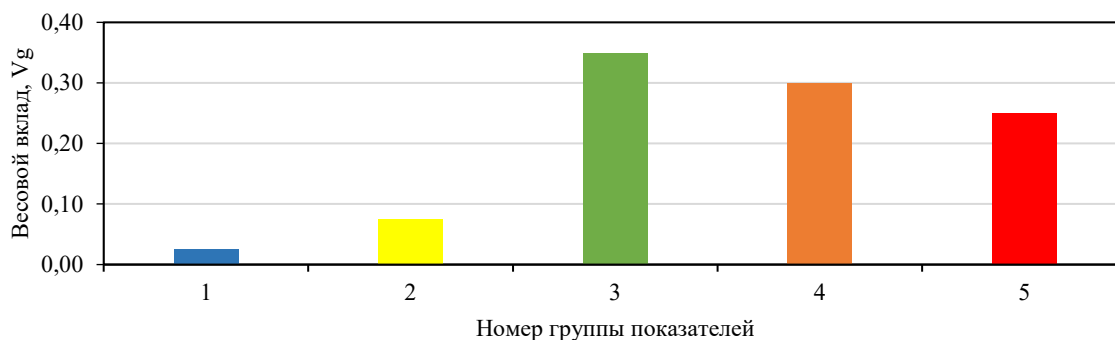


Рис. 2. Весовые коэффициенты  $V_g$  для различных групп показателей: 1 — органолептических; 2 — обобщенных; 3 — санитарно-микробиологических и паразитологических; 4 — радиационных; 5 — санитарно-химических.

При расчете эффективности снижения риска для здоровья населения в результате водоподготовки ( $\Xi$ ) учитывали значение совокупных рисков до ( $\bar{R}_{до}$ ) и после ( $\bar{R}_{после}$ ) водоподготовки:

$$\Xi = \frac{\bar{R}_{до} - \bar{R}_{после}}{\bar{R}_{до}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

По полученному значению  $\Xi$  (%) определили качественное значение степени эффективности проведенных мероприятий (рис. 3).

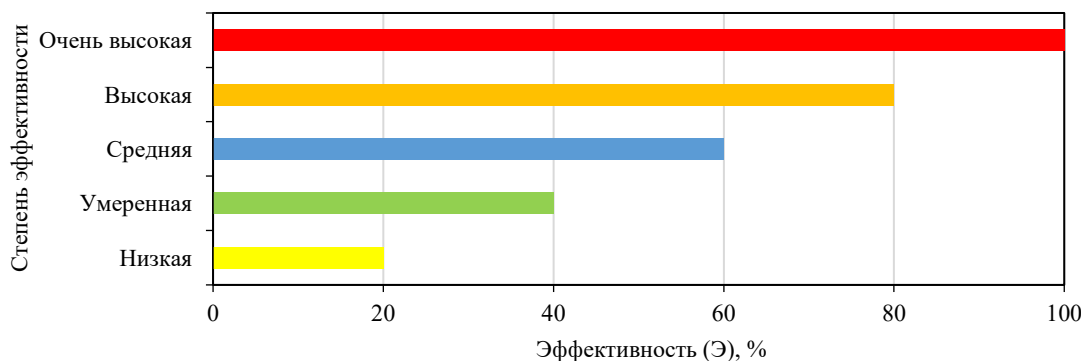


Рис. 3. Эффективность водоподготовки, %

Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения в проведенном исследовании проводилась с использованием программы, реализующей МР 2.1.4.0289–22<sup>10</sup>. Исходные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Данные санитарно-гигиенического мониторинга воды, поступающей в центральные системы водоснабжения

№	Наименование контролируемого параметра	Группа параметров	Единицы измерения	ПДЗ	Значение параметров до очистки	Значение параметров после очистки методом № 1	Значение параметров после очистки методом № 2
1	Запах	Органолептические показатели	баллы	2	3	1	1
2	Цветность		градусы	20	25	16	10
3	Мутность по формазину		ЕМФ	2,6	5	2,0	0,5
4	Сухой остаток	Обобщенные показатели	г/м <sup>3</sup>	1	1,5	0,15	0,11
5	Жесткость		мг·экв/л	7	20	10	6
6	Нефтепродукты		мг/л	0,1	0,2	0	0

<sup>10</sup> Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj91e2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

№	Наименование контролируемого параметра	Группа параметров	Единицы измерения	ПДЗ	Значение параметров до очистки	Значение параметров после очистки методом № 1	Значение параметров после очистки методом № 2
7	ПАВ анионоактивные		мг/л	0,5	0,5	0	0
8	Водородный показатель		ед.	6—9	8	7	7
9	Общее микробное число (ОМЧ)	Санитарно-микробиологические и паразитологические	КОЕ/см <sup>3</sup>	50	60	45	35
10	Escherichiacoli (E.coli)		КОЕ/100 см <sup>3</sup>	есть / нет	есть	нет	нет
11	Энтерококки		КОЕ/100 см <sup>3</sup>	есть / нет	нет	нет	нет
12	Колифаги		КОЕ/100 см <sup>3</sup>	есть / нет	нет	нет	нет
13	Цисты и ооцисты патогенных простейших		Определение в 50 л	есть / нет	нет	нет	нет
14	Возбудители кишечных инфекций		Определение в 10 л	есть / нет	нет	нет	нет
15	Аммиак и аммоний-ион	Санитарно-химические показатели	мг/л	2	4,2	1,8	1,1
16	Медь		мг/л	0,5	1,5	0,25	0,05
17	Кадмий		мг/л	0,001	0,0012	0	0
18	Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )		мг/л	500	528	385,0	250,0
19	Нитраты (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		мг/л	45	90	40,0	25,0
20	Нитриты (по NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )		мг/л	3	4,8	3,0	1,2
21	Железо		мг/л	0,3	0,6	0,3	0,1
22	Хлориды (по Cl)		мг/л	350	375	345,0	263,0
23	Цинк		мг/л	5	5,5	4,0	2,5

**Результаты исследования.** Результаты расчета параметров для оценки эффективности водоподготовки приведены в таблице 3. Рассмотрены три варианта: до проведения очистки, после очистки методом № 1, после очистки методом №2.

Таблица 3

Доля вклада каждой группы параметров

№	Группа параметров (показатели)	Риск группы				
		До очистки	После очистки методом № 1	Снижение негативного влияния после очистки методом № 1	После очистки методом № 2	Снижение негативного влияния после очистки методом № 2
1	Органолептические	0,42	0	0,42	0	0,42
2	Обобщенные	0,31	0,21	0,10	0,19	0,12
3	Санитарно-микробиологические и паразитологические	0,04	0,03	0,01	0	0,04
4	Санитарно-химические	0,09	0,03	0,06	0	0,09

По данным таблицы 1 видно, что в исходной воде (до очистки) практически все контролируемые параметры превышают ПДЗ. Наибольший совокупный риск в этом случае формируют органолептические (0,42) и обобщенные показатели (0,31), что обусловлено значительным превышением нормативов по мутности, цветности, жесткости и сухому остатку. Санитарно-химические показатели также вносят существенный вклад (0,09) за счет повышенных концентраций меди, нитратов, нитритов и аммиака.

Полученные результаты демонстрируют разный уровень очистки двух рассматриваемых методов. На основании проведенных расчетов определена степень эффективности очистки по каждому методу (таблица 4).

Таблица 4

Совокупный риск для здоровья населения для каждого сценария водоподготовки

Сценарий	Совокупный риск, R	Эффективность, %	Степень эффективности
До очистки	0,36	–	–
После очистки методом № 1	0,16	55	средняя
После очистки методом № 2	0,007	82	очень высокая

Установлено, что применение метода очистки воды №1 показывает среднюю эффективность очистки, поскольку риск для здоровья населения снижается с 0,36 до 0,16. При этом в воде сохраняются физические тонкодисперсные примеси, химические загрязнители (нитраты, нитриты), ионы некоторых металлов (например, алюминия), побочные продукты обеззараживания (соединения хлора). Метод № 2 обеспечивает снижение совокупного риска до 0,007, что свидетельствует о высокой эффективности водоподготовки.

На рис. 4 наглядно представлена динамика риска для здоровья населения по каждой группе контролируемых параметров. На гистограмме продемонстрировано исключение риска для здоровья населения по органолептическим и санитарно-химическим показателям качества воды в результате применения метода очистки № 2.

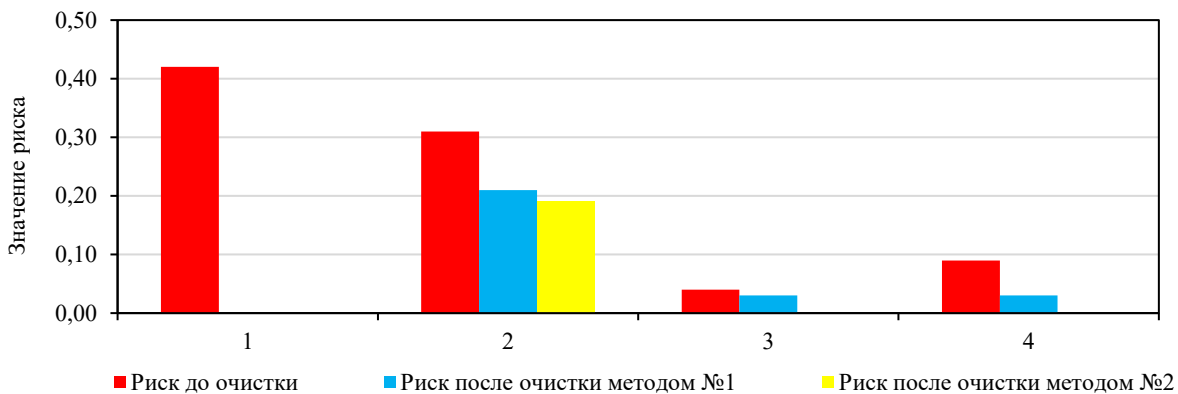


Рис. 4. Значение риска для каждой группы контролируемых параметров: 1 — органолептические показатели; 2 — обобщенные показатели; 3 — санитарно-микробиологические и паразитологические; 4 — санитарно-химические показатели.

На рис. 5, 6 приведено графическое представление результатов расчетов.

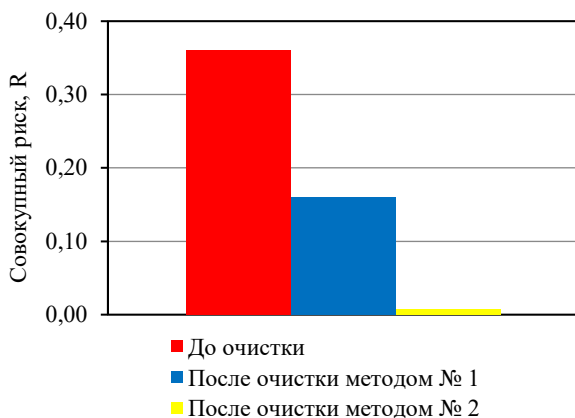


Рис. 5. Совокупный риск для каждого сценария очистки

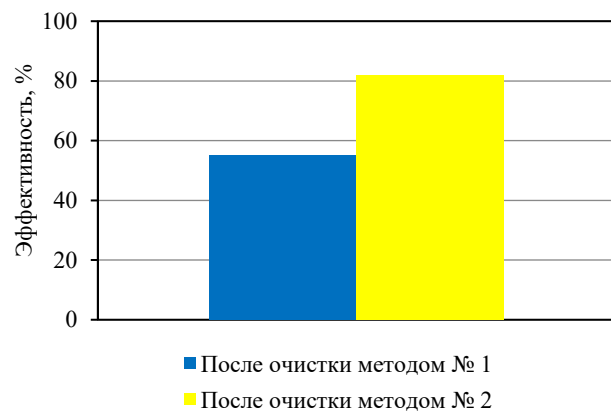


Рис. 6. Эффективность очистки рассматриваемых методов очистки

**Обсуждение.** Проведенное исследование наглядно демонстрирует существенные различия в эффективности двух рассмотренных подходов к водоочистке Сурского водохранилища. Анализ данных, представленных в таблице 2 и на рис. 4, показывает, что исходная вода по многим ключевым параметрам (запах, цветность, мутность, жесткость, аммиак, нитраты и др.) не соответствует санитарным нормативам, что подтверждает высокий исходный совокупный риск для здоровья населения (таблица 3).

Существующая технология № 1, основанная на коагуляции и хлорировании, действительно приводит большинство параметров в рамки предельно допустимых значений. Однако её эффективность можно охарактеризовать как недостаточную. По ряду критически важных показателей, таких как нитриты (3,0 мг/л при ПДЗ 3 мг/л) и железо (0,3 мг/л при ПДЗ 0,3 мг/л), водоподготовка происходит лишь до верхней границы норматива. Это не создает необходимого «запаса прочности» и оставляет систему уязвимой при сезонных ухудшениях качества исходной воды. Как следствие, после применения технологии № 1 сохраняется значительный остаточный риск по группам обобщенных (0,21) и санитарно-химических (0,03) показателей (рис. 5), что связано с неполным удалением тонкодисперсных примесей, растворенных химических веществ и образованием побочных продуктов хлорирования.

В свою очередь, предложенный многоступенчатый способ № 2 демонстрирует кардинально более высокий уровень водоподготовки. Он не просто приводит параметры в соответствие с ПДЗ, а значительно снижает их концентрацию. Например, мутность уменьшается до 0,5 ЕМФ (при норме 2,6), концентрация сульфатов — до 250 мг/л (при норме 500), а аммоний-иона — до 1,1 мг/л (при норме 2). Такая глубокая очистка является прямым следствием технологических особенностей данного подхода: ультрафильтрация и сорбция эффективно удаляют как взвешенные частицы, так и растворенные органические и химические соединения, а двухстадийное обеззараживание (УФ-излучение + хлорамин) обеспечивает полную микробиологическую безопасность при минимизации побочных продуктов.

Ключевым результатом является динамика снижения совокупного риска, представленная на рис. 5. Способ № 2 полностью (до нуля) устраняет риски, связанные с органолептическими, санитарно-микробиологическими и санитарно-химическими показателями. Общий совокупный риск снижается до пренебрежимо малого значения 0,007. Это свидетельствует о том, что данная технология позволяет получать питьевую воду не только формально безопасную, но и качественно лучшую, с превосходными органолептическими свойствами, что повышает надежность и безопасность всей системы централизованного водоснабжения.

**Заключение.** В рамках данного исследования была успешно решена поставленная цель — проведена сравнительная оценка эффективности двух технологий водоподготовки питьевой воды на основе показателя совокупного риска для здоровья человека.

В ходе работы были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ состава воды из Сурского водохранилища, который выявил превышение ПДЗ по ряду органолептических, обобщенных и санитарно-химических параметров, что обуславливает высокий исходный совокупный риск для здоровья населения, рассчитанный на уровне 0,36;
- выполнен расчет совокупного риска для трех сценариев: до водоподготовки, после применения существующей технологии № 1 и после применения предложенной технологии № 2;
- проведена оценка эффективности, которая показала, что существующая технология № 1 обладает средней степенью результативности (55 %), в то время как предложенная технология № 2 — очень высокой (82 %).

Проведенное исследование доказало, что существующая технология водоподготовки, основанная на коагуляции и хлорировании, является недостаточно эффективной. Она снижает совокупный риск лишь до 0,16, оставляя остаточные риски по обобщенным и санитарно-химическим показателям и не создавая необходимого запаса надежности, поскольку концентрации некоторых загрязнителей остаются на верхней границе нормативов.

В то же время наглядно продемонстрировано, что предложенный многоступенчатый способ № 2, включающий ультрафильтрацию, сорбцию и двухстадийное обеззараживание, позволяет достичь кардинально более высокого уровня водоочистки. Данная технология снижает совокупный риск до пренебрежимо малого значения 0,007, полностью устраняя риски по органолептическим, санитарно-микробиологическим и санитарно-химическим показателям.

Таким образом, работа показывает, что применение современных многоступенчатых технологий водоподготовки позволяет не просто формально соблюдать нормативы, а получать питьевую воду значительно более высокого качества. Это обеспечивает создание «запаса прочности» системы водоснабжения при сезонных и аварийных ухудшениях качества исходной воды. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научного обоснования для принятия решений о модернизации действующих станций водоподготовки и внедрения наилучших доступных технологий для обеспечения населения качественной и безопасной питьевой водой.

## Список литературы / References

1. Клейн С.В., Вековшинина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения. *Анализ риска здоровью*. 2020;3:49–60. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
- Kleyn SV, Vekovshinina SA. Priority Risk Factors Related to Drinking Water from Centralized Water Supply System that Create Negative Trends in Population Health. *Health Risk Analysis*. 2020;3:49–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
2. Богданьянц М.В. Влияние качества питьевой воды на заболеваемость детского населения. *Сибирское медицинское обозрение*. 2024;4:23–33. <https://doi.org/10.20333/25000136-2024-4-23-33>
- Bogdanyants MV. Effect of Drinking Water Quality on the Morbidity of Paediatric Population. *Siberian Medical Review*. 2024;4:23–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.20333/25000136-2024-4-23-33>
3. Иванов С.В., Федорова Э.Л., Темиров Э.Э. Влияние качества воды на здоровье населения. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017;3(2):186–189.
- Ivanov SV, Fedorova EL, Temirov EE. Influence of Water Quality on Population Health. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;3(2):186–189. (In Russ.)
4. Маркова Е.О., Корякина Ю.П., Фаращук Н.Ф., Киган М.А. Влияние химических веществ питьевой воды на здоровье населения. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2023;1:239–249. <https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.1.31>
- Markova EO, Koriakina YuP, Farashchuk NF, Kigan MA. Influence of Drinking Water Chemical Substances on Public Health. *Vestnik of Smolensk State Medical Academy*. 2023;1:239–249. (In Russ.) <https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.1.31>
5. Cotruvo JA, Amato H. National Trends of Bladder Cancer and Trihalomethanes in Drinking Water: A Review and Multicountry Ecological Study. *Dose Response*. 2019;17(1):1559325818807781. <https://doi.org/10.1177/1559325818807781>
6. Uhl M, Santos RR, Costa J, Santos O, Virgolino A, Evans DS, et al. Chemical Exposure: European Citizens' Perspectives, Trust, and Concerns on Human Biomonitoring Initiatives, Information Needs, and Scientific Results. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(4):1532. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041532>
7. Wei-Yi Wu, Pei-Li Chou, Jyh-Chin Yang, Chiang-Ting Chien. Silicon-Containing Water Intake Confers Antioxidant Effect, Gastrointestinal Protection, and Gut Microbiota Modulation in the Rodents. *PLoS One*. 2021;16(3):e0248508 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248508>
8. Richardson SD, Ternes TA. Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues. *Analytical Chemistry*. 2022;94(1):382–416. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c04640>
9. Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Mariñas BJ, Mayes AM. Science and Technology for Water Purification in the Coming Decades. *Nature*. 2008;452:301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
10. Jia-Qian Jiang. The Role of Coagulation in Water Treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2015;8:36–44 <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
11. Vannucci L, Fossi C, Quattrini S, Guasti L, Pampaloni B, Gronchi G, et al. Calcium Intake in Bone Health: A Focus on Calcium-Rich Mineral Waters. *Nutrients*. 2018;10(12):1930 <https://doi.org/10.3390/nu10121930>
12. Rutjes AWS, Denton DA, Di Nisio M, Lee-Yee Chong, Abraham RP, Al-Assaf AS, et al. Vitamin and Mineral Supplementation for Maintaining Cognitive Function in Cognitively Healthy People in Mid and Late Life. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2018;12(12):CD011906. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011906.pub2>
13. Дахова, Е.В., Целых Е.Д. Влияние состава питьевой воды на состояние некоторых систем организма человека. *Ученые заметки ТОГУ*. 2015;6(4):446–451.
- Dakhova EV, Celikh ED. Influence of Drinking Water in the State of Some Human Body Systems. *Scientists Notes PNU*. 2015;6(4):446–451. (In Russ.)
14. Pelczyńska M, Moszak M, Bogdański P. The Role of Magnesium in the Pathogenesis of Metabolic Disorders. *Nutrients*. 2022;14(9):1714. <https://doi.org/10.3390/nu14091714>
15. Farrell-Poe K, Jones-McLean L, McLean S. *Nitrate in Private Water Wells*. Arizona Cooperative Extension; 2010. URL: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1486i.pdf> (accessed 18.05.2026)
16. Васильев В.В., Рябинина Т.В., Перекусихин М.В., Васильев Е.В. Обеспечение населения региона качественной питьевой водой в рамках реализации проекта «Чистая вода» в Пензенской области. *ЗНУСО*. 2021;2:35–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-335-2-35-42>
- Vasilyev VV, Ryabinina TV, Perekusihin MV, Vasilev EV. Provision of Safe Drinking Water to the Local Population within the Clean Water Project Implemented in the Penza Region. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2021;2:35–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-335-2-35-42>

17. Макаров А.Л., Беляев А.П. Методы очистки воды. *StudNet*. 2020;3(4):230–234.

Makarov AL, Belyaev AN. Industrial Methods of Water Treatment. *StudNet*. 2020;3(4):230–234. (In Russ.)

18. Новикова А.Е., Руина К.С. Современные методы очистки воды. *Вестник науки*. 2021;1(34):146–149.

Novikova AE, Ruin KS. Modern Water Purification Methods. *Vestnik Nauki*. 2021;1(34):146–149. (In Russ.)

**Об авторах:**

**Кристина Дмитриевна Мишина**, аспирант, ассистент кафедры «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [kristina\\_mishina\\_1998@mail.ru](mailto:kristina_mishina_1998@mail.ru)

**Оксана Евгеньевна Безбородова**, доктор технических наук, заведующая кафедрой «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [oxana243@yandex.ru](mailto:oxana243@yandex.ru)

**Наталья Владленовна Камардина**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [alisa-melafon@mail.ru](mailto:alisa-melafon@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**К.Д. Мишина:** проведение расчета, математического моделирования.

**О.Е. Безбородова:** описание теоретической части статьи.

**Н.В. Камардина:** анализ существующих источников, оформление научной статьи.

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

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Kristina D. Mishina**, Postgraduate Student, Assistant of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [kristina\\_mishina\\_1998@mail.ru](mailto:kristina_mishina_1998@mail.ru)

**Oksana E. Bezborodova**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [oxana243@yandex.ru](mailto:oxana243@yandex.ru)

**Natalya V. Kamardina**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [alisa-melafon@mail.ru](mailto:alisa-melafon@mail.ru)

**Claimed Contributorship:**

**KD Mishina:** calculation, mathematical modeling.

**OE Bezborodova:** theoretical part.

**NV Kamardina:** analysis, writing – original draft preparation.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 24.01.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 27.02.2026

**Принята к публикации / Accepted** 10.03.2026

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.339

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

### Регенерация фильтровального материала гидродинамического фильтра

В.А. Девисиллов , Н.П. Фролов 

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва,

Российская Федерация

✉ [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

EDN: XTWYU

#### Аннотация

**Введение.** В промышленных системах фильтрации одной из ключевых проблем является снижение пропускной способности фильтра вследствие накопления улавливаемых частиц и образования слоя осадка на фильтровальной перегородке. Это ведёт к росту гидравлического сопротивления, увеличению энергопотребления и вынужденным остановкам на обслуживание. Повышение ресурса фильтрующих элементов без потери производительности остаётся актуальной технологической задачей, для решения которой применяются методы регенерации гидродинамических фильтров — в частности, вращение фильтровального элемента и наложение вибрационных воздействий. Однако существующие исследования рассматривают эти методы преимущественно изолированно: отсутствуют теоретические модели, описывающие совместное действие центробежных и вибрационных сил, не получены экспериментальные данные о синергетическом эффекте их комбинирования, а также не разработаны критерии оптимизации такого комбинированного воздействия с учётом режимных параметров и адгезионных свойств осадка. Целью работы являлась разработка расчётного метода оптимизации комбинированного центробежно-вибрационного воздействия на основе аналитического и экспериментального исследования его влияния на эффективность регенерации гидродинамических фильтров.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на экспериментальном стенде с гидродинамическим вибрационным фильтром, оснащённым цилиндрической фильтровальной перегородкой из комбинированного пористого сетчатого металла (тонкость очистки 10 мкм), которой независимо сообщались вращательное и вибрационное движения. Для описания условий отрыва частиц осадка была разработана аналитическая модель на основе баланса сил, действующих на частицу на вращающейся и вибрирующей поверхности. Она позволила оценить эффективность регенерации фильтра в зависимости от режимных параметров. Эксперименты проводились на водных суспензиях электрокорунда (200–250 мкм) и карбида кремния (60–80 мкм) объёмной концентрацией 0,1 %. Режим регенерации включал одновременное увеличение скорости вращения перегородки до 1000 об/мин и наложение вибрации с амплитудой 1 мм при варьируемой частоте 50, 60 и 70 Гц с перекрытием патрубка фильтрата для устранения удерживающего перепада давления.

**Результаты исследования.** Экспериментально установлены количественные зависимости эффективности регенерации от частоты вращения, амплитуды и частоты вибрации. Разработана аналитическая модель баланса сил, позволяющая прогнозировать степень очистки для произвольных сочетаний указанных параметров. Верификация модели показала, что расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает 15–20 %, что подтверждает её пригодность для инженерных расчётов. На базе модели предложен расчётный метод оптимизации, обеспечивающий выбор комбинации режимных параметров, при которой достигается требуемый уровень очистки при минимальных энергозатратах и допустимых механических нагрузках на конструкцию.

**Обсуждение.** Низкая эффективность чисто центробежной регенерации (2–20 %) объясняется тем, что для мелкодисперсных частиц отношение адгезионных сил к инерционным существенно выше, чем для крупных, что согласуется с классической теорией адгезии Дерягина. Синергетический эффект комбинированного воздействия обусловлен дополнением радиального центробежного усилия тангенциальными сдвиговыми напряжениями, генерируемыми вибрацией, что обеспечивает более полное разрушение адгезионных связей в слое осадка. Расхождение модели с экспериментом в пределах 15–20 % связано главным образом с неопределённостью в определении адгезионных характеристик пары «частица – фильтровальная перегородка», однако такая точность

© Девисиллов В.А., Фролов Н.П., 2026

является приемлемой для инженерного подбора режимных параметров. Полученные закономерности качественно согласуются с известными литературными данными о раздельном влиянии вращения и вибрации на удаление осадков, но впервые количественно описывают их совместное действие. Ограничением работы является валидация модели только для водных суспензий, что требует дополнительных исследований при переходе к вязким и неньютоновским средам.

**Заключение.** Экспериментально доказано, что комбинирование центробежного и вибрационного воздействий позволяет повысить эффективность регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра до 60–80 % по сравнению с 2–20 % при использовании только вращения. Разработана аналитическая модель на основе баланса сил, верифицированная экспериментально с погрешностью не более 20 %, пригодная для инженерного расчёта оптимальных режимов регенерации. Показано, что ключевым параметром, определяющим точность прогноза, являются адгезионные свойства частиц, требующие экспериментального определения для каждой конкретной системы. Результаты создают научную основу для проектирования самоочищающихся фильтровальных аппаратов непрерывного действия. Перспективным направлением является адаптация предложенной методики для реологически сложных промышленных сред и оптимизация энергопотребления вибросистемы.

**Ключевые слова:** фильтрование, регенерация, гидродинамический фильтр, центробежная очистка, вибрационная очистка

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования.** Девисилов В.А., Фролов Н.П. Регенерация фильтровального материала гидродинамического фильтра. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(2):132–141. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

*Original Empirical Research*

## Regeneration of Filter Material of Hydrodynamic Vibration Filter

Vladimir A. Devisilov , Nikita P. Frolov 

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

### Abstract

**Introduction.** In industrial filtration systems, one of the main challenges is reducing the filter capacity due to the accumulation of retained particles and the formation of sediment layer on the filter baffle. This results in increased hydraulic resistance, increased energy consumption, and forced service stops. Extending the lifespan of filter elements while maintaining productivity is a crucial technological challenge. This involves methods such as the regeneration of hydrodynamic filters, including the rotation of the filter element and the use of vibration effects. However, current research focuses on these methods individually, with no theoretical models for the combined effect of centrifugal and vibrational forces. Experimental data on the synergy between these forces has not been collected, and criteria for optimizing this combined effect have not been established considering operating parameters and the adhesive properties of sediment. The aim of this research was to develop a computational method for optimizing the combined centrifugal-vibration effect, based on an analytical and experimental study of its impact on the regeneration efficiency of hydrodynamic filters.

**Materials and Methods.** The research was conducted on a laboratory test bench with a hydrodynamic vibrating filter equipped with a cylindrical filter baffle made of a combined porous mesh metal (fineness of 10  $\mu\text{m}$ ), which could perform independent rotational and vibrational movements. To describe the condition for sediment particle detachment, an analytical model was developed based on the balance of forces acting on a particle on a rotating and vibrating surface. This allowed us to evaluate the effectiveness of filter regeneration based on operating parameters. The experiments were conducted using aqueous suspensions of electrocorundum (200–250  $\mu\text{m}$ ) and silicon carbide (60–80  $\mu\text{m}$ ) with a volume concentration of 0.1%. The regeneration mode involved a simultaneous increase in the rotational speed of the baffle to 1000 rpm and vibration with an amplitude of 1 mm at a variable frequency of 50, 60 and 70 Hz with the filtrate outlet closed to eliminate the change of pressure.

**Results.** Quantitative dependencies of the regeneration efficiency on rotational speed, vibration amplitude and frequency were experimentally determined. An analytical model of force balance was developed, which allowed predicting the degree of purification for any combination of these parameters. Verification of the model showed that the discrepancy between the calculated and experimental data did not exceed 15–20%, confirming its suitability for engineering calculations. Based on the model, a computational optimization method was proposed that provided a choice of a combination of operating parameters at which the required level of cleaning was achieved with minimal energy consumption and permissible mechanical loads on the structure.

**Discussion.** The low efficiency of purely centrifugal regeneration (2–20%) was explained by the fact that for fine particles, the ratio of adhesive forces to inertial forces was significantly higher than for coarse particles. This was consistent with the Derjaguin classical theory of adhesion. The synergistic effect of the combined effect was due to the addition of radial centrifugal force by tangential shear stresses generated by vibration, which ensured a more complete destruction of adhesive bonds in the sediment layer. The discrepancy between the model and the experiment in the range of 15–20% was mainly due to uncertainty in determining the adhesion characteristics of the particle – filter baffle pair. However, this level of accuracy was acceptable for the engineering selection of operating parameters. The obtained patterns were qualitatively consistent with the known literature data on the individual effects of rotation and vibration on sediment removal, but for the first time, they quantitatively describe their combined effect. One limitation of the study was the validation of the model for aqueous suspensions only, which required additional research to extend it to viscous and non-Newtonian media.

**Conclusion.** It has been experimentally proven that the combination of centrifugal and vibrational effects can increase the regeneration efficiency of the hydrodynamic filter baffle by 60–80%, compared to 2–20% with rotation alone. An analytical model has been developed based on the balance of forces, and verified experimentally with an error of no more than 20%. This model is suitable for engineering calculations of optimal regeneration modes. It is demonstrated that the key parameter determining the accuracy of the forecast is the adhesion properties of particles, which require experimental determination for each system. The results provide a scientific basis for designing continuous self-cleaning filtration devices. A promising direction for future research is the adaptation of this technique to rheologically complex industrial environments, as well as optimizing energy consumption in the vibration system.

**Keywords:** filtration, regeneration, hydrodynamic filter, centrifugal cleaning, vibration cleaning

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

**For Citation.** Devisilov VA, Frolov NP. Regeneration of Filter Material of Hydrodynamic Vibration Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):132–141. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

**Введение.** Очистка технологических жидкостей и сточных вод [1] от механических примесей методом фильтрования представляет собой обязательный и критически важный процесс в таких отраслях, как нефтехимия, энергетика и водоподготовка [2]. Результативность данного процесса напрямую определяет стабильность технологических циклов, срок службы оборудования, качество конечной продукции и соответствие экологическим нормативам [3]. Ключевой эксплуатационной проблемой в рассматриваемой области является интенсивное загрязнение фильтровального материала (фильтровальной перегородки) в ходе работы. Это приводит к резкому возрастанию гидравлического сопротивления, что, в свою очередь, вызывает значительное увеличение энергозатрат [4]. Помимо этого, активное зарастание перегородки осадком повышает риск её механического разрушения и ведёт к незапланированным остановкам производства для регенерации или замены фильтрующих элементов. Традиционные методы очистки, такие как обратная промывка, требуют прекращения работы фильтра или применения сложных систем с дублирующими линиями, что снижает общую производительность и увеличивает капитальные затраты [5].

В качестве перспективного решения указанной проблемы рассматривается использование фильтров с возможностью непрерывной или периодической регенерации без остановки основного процесса. Одним из таких типов аппаратов являются гидродинамические фильтры (ГДФ), в которых для снижения осаждения частиц на фильтровальной перегородке (ФП) комбинируется эффект центробежной сепарации и тангенциальная подача потока вдоль её поверхности [6]. В отличие от фильтрующих центрифуг, в ГДФ поток направляется снаружи внутрь вращающейся ФП, что усиливает действие центробежных сил на сформировавшийся слой осадка [7]. Самостоятельным направлением интенсификации регенерации фильтров служит вибрационное воздействие на фильтровальный элемент, способствующее разрушению адгезионных связей в слое загрязнений [8].

Анализ современных исследований свидетельствует о том, что влияние вращения ФП [7] и вибрационного воздействия [8] на процесс фильтрования изучалось, как правило, изолированно. Вместе с тем в научной литературе практически отсутствуют систематические исследования комбинированного влияния этих двух типов силовых полей на результативность регенерации гидродинамических фильтров. Кроме того, недостаточно разработаны универсальные расчётные методы, позволяющие количественно оценивать эффективность подобного комбинированного воздействия с учётом ключевых факторов, прежде всего адгезионных свойств улавливаемых частиц по отношению к материалу фильтровальной перегородки [9]. Таким образом, существует очевидный научно-практический пробел, обусловленный отсутствием методики для обоснованного выбора оптимальных режимов совместного центробежного и вибрационного воздействия, основанной на физической модели процесса отрыва частицы.

Целью настоящей работы является экспериментальное и аналитическое исследование синергетического эффекта от комбинированного центробежно-вибрационного воздействия на процесс регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра и разработка на этой основе верифицированной расчётной методики для оптимизации параметров регенерации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие последовательные задачи:

- анализ литературных данных по методам регенерации ФП и выявление пробела, касающегося комплексного воздействия силовых полей;
- разработка аналитической и расчётной моделей процесса отрыва частицы от ФП, основанных на балансе удерживающих (силы адгезии, сила давления потока) и отрывающих (центробежная сила, инерционная сила от вибрации) сил;
- экспериментальное исследование на специально созданном испытательном стенде отдельного и совместного влияния скорости вращения ФП, а также амплитуды и частоты вибрации на эффективность удаления осадка при фильтровании суспензий с частицами различной природы (электрокорунд, карбид кремния);
- верификация разработанной расчётной модели путём сопоставления аналитических оценок эффективности регенерации с полученными экспериментальными данными.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на специально разработанном стенде с гидродинамическим вибрационным фильтром, схема которого представлена на рис. 1.

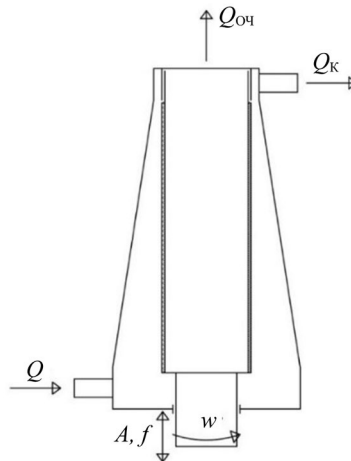


Рис. 1. Схема гидродинамического вибрационного фильтра ( $Q$  — расход исходной жидкости,  $Q_{оч}$  — расход очищенной жидкости,  $Q_k$  — расход концентрата,  $w$  — скорость вращения фильтровальной перегородки,  $A$  — амплитуда вибровоздействия,  $f$  — частота вибровоздействия)

Основная конструктивная особенность аппарата заключается в возможности независимого сообщения цилиндрической фильтровальной перегородке (ФП) вращательного движения от электродвигателя и возвратно-поступательного (вибрационного) движения от вибростенда. Основные геометрические параметры: высота корпуса — 186 мм, внешний диаметр ФП — 21 мм, толщина ФП — 1 мм. Более подробное описание принципа действия и компоновки приведено в работе [10].

Для анализа процесса регенерации применена модель, основанная на балансе сил, действующих на частицу в слое осадка на вибрирующей и вращающейся поверхности (рис. 2), по аналогии с подходами, изложенными в работах «Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок» [11] и «Эффективность регенерации щелевого фильтра» [12].

Условие отрыва частицы описывается неравенством:

$$\cos(\varphi) \left( (mg + F_{wv})^2 + (F_{wc})^2 \right) > (F_t)^2 + (F_n + F_{\Delta P})^2 \quad (1)$$

Разделив обе части на величину  $(mg)^2$ , характеризующую общий вес загрязнений на фильтровальной перегородке, получаем выражение для эффективности регенерации:

$$\eta < \left[ \frac{(mg + F_{wv})^2 + (F_{wc})^2}{(gm)^2} - \frac{(F_t)^2 + (F_n + F_{\Delta P})^2}{(gm)^2} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\eta$  характеризует эффективность регенерации. В случае, если  $\eta = 1$ , при регенерации все частицы удаляются с фильтрующего материала.

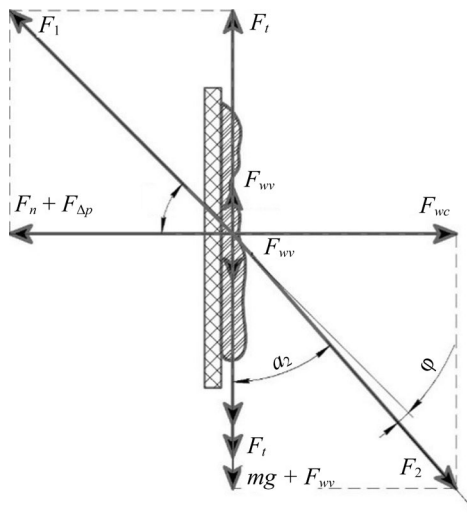


Рис. 2. Схема действия сил, где  $mg$ , Ньютон (далее – н) — вес слоя загрязнений ( $m$  – масса, кг;  $g$  – ускорение свободного падения  $m/c^2$ );  $F_n$ ,  $H$  и  $F_t$ , н – нормальная и тангенциальная составляющие силы адгезии,  $F_{wv}$ , н и  $F_{wc}$ , н – силы, возникающие в процессе регенерации из-за воздействия вибрации и вращения фильтровальной перегородки соответственно,  $F_{\Delta p}$ , н – сила перепада давления на перегородке

Силы  $F_{wc}$  и  $F_{wv}$  зависят от режима работы аппарата — скорости вращения и параметров вибрации [13] — и рассчитываются по формулам:

$$F_{wc} = mr \left( \frac{2\pi v}{60} \right)^2, \quad (3)$$

$$F_{wv} = mA(2\pi f)^2, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус фильтровальной перегородки, м;  $v$  — скорость вращения фильтровальной перегородки, об/мин;  $A$  — амплитуда вибрации, м;  $f$  — частота вибрации, Гц [14].

Сила перепада давления, согласно теории фильтрации с образованием несжимаемого осадка будет равна [15]:

$$F_{\Delta p} = \Delta P S, \quad (5)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления на перегородке, Па;  $S$  — площадь фильтровальной перегородки,  $m^2$ . Перепад давления в процессе работы и накопления осадка будет возрастать [16].

По теории Дерягина сила нормального отрыва выражается формулой:

$$F_n = 4\pi\sigma r, \quad (6)$$

$$F_t = \mu F_n, \quad (7)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границах двух тел;  $r$  — радиус кривизны частиц,  $\mu$  — коэффициент трения.

В качестве механических примесей (дисперсной среды) использовались два типа частиц: электрокорунд и карбид кремния. В качестве очищаемой среды (дисперсионной среды) использовалась вода. Характеристики частиц приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики частиц загрязнения

Тип частицы	Коэффициент проницаемости слоя частиц, $m^2$	Плотность, $кг/м^3$	Диаметр частиц, $мкм$
Электрокорунд	$3,2 \cdot 10^{-14}$	3950	200–250
Карбид кремния	$4,2 \cdot 10^{-14}$	3200	60–80

В качестве фильтровальной перегородки применяли проницаемый материал, изготовленный по технологии, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, а именно методом горячей прокатки в вакууме на основе металлических сеток с толщиной очистки 10  $мкм$  — так называемых комбинированных пористых сетчатых металлов [17]. Характеристики фильтровальной перегородки определяли в соответствии с [18]. Проницаемость перегородки и слоя осадка [19] устанавливали экспериментально непосредственно на исследуемом аппарате. В качестве дисперсионной среды использовали воду комнатной температуры. Суспензию объёмной концентрацией 0,1 % приготавливали в ёмкости объёмом 300 л, оснащённой лопастной мешалкой для поддержания однородности состава.

Эксперимент осуществлялся следующим образом.

1. Подготовка суспензии. В баке, оснащенной электромешалкой, готовилась однородная водная суспензия с массовой концентрацией твердых частиц (загрязнений) 0,1 % по объему.

2. Цикл фильтрации (рабочий режим). Суспензия подавалась на вход фильтра. Фильтровальная перегородка вращалась с постоянной скоростью 300 об/мин. Процесс фильтрации продолжался в течение заданного времени или до достижения определенного перепада давления.

3. Инициация режима регенерации. По истечении времени фильтрации начиналась 30-секундная стадия регенерации, которая включала:

- перекрытие патрубка отвода очищенного фильтрата для устранения удерживающей силы, вызванной перепадом давления;

- одновременное увеличение скорости вращения фильтровальной перегородки до 1000 об/мин;

- одновременное включение вибрационного воздействия на перегородку с амплитудой 1 мм. При этом частота вибрации варьировалась от эксперимента к эксперименту, принимая значения 50, 60 или 70 Гц.

4. Удаление регенерированного осадка. В течение всей стадии регенерации жидкость направлялась в патрубок для отвода концентрата, увлекая тем самым отделенные от перегородки частицы.

5. Возврат в рабочий режим. По окончании 30 секунд режим регенерации отключался: вибрация прекращалась, скорость вращения перегородки снижалась до 300 об/мин, а патрубок фильтрата открывался. Аппарат возвращался к шагу 2 для следующего цикла фильтрации.

Для измерения расхода использовали магнитно-индукционный расходомер Dwyer MFS-11 с относительной погрешностью измерений  $\pm 2\%$  производства США. Для измерения перепада давления — датчики давления Nyadac HDA 4748-N-0009-000 (приведенная погрешность  $\pm 0,5\%$ ) производства Германии с регистратором данных HMG 3000. Контроль концентрации проводили с использованием анализаторов FCU 2000 и CS 2000 или фотонелиметра «Фотон-965» (Россия). В качестве привода использовали асинхронный электродвигатель (Россия) и вибростенд Tira Vib (Германия).

**Результаты исследования.** Результаты расчетных и экспериментальных исследований эффективности регенерации фильтровального материала при очистке жидкости от электрокорунда приведены на рис. 3.

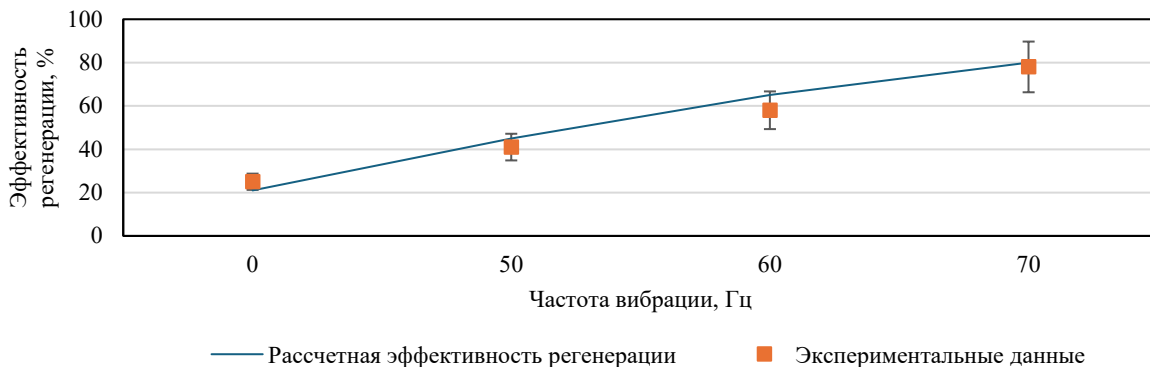


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные данные при регенерации фильтровальной перегородки после выполнения цикла фильтрации жидкости от электрокорунда

Результаты расчетных и экспериментальных исследований эффективности регенерации фильтровального материала при очистке жидкости от карбида кремния приведены на рис. 4.

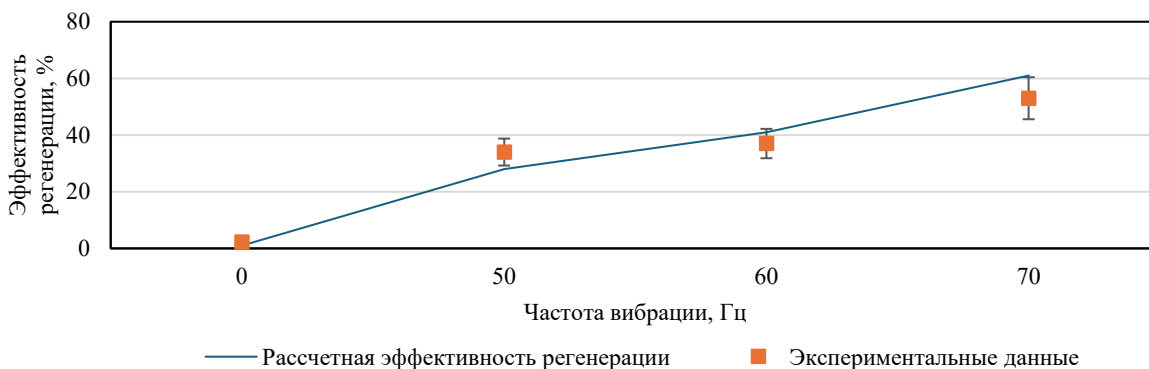


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные данные при регенерации фильтровальной перегородки после выполнения цикла фильтрации жидкости от карбида кремния

Результаты экспериментальной эффективности регенерации ( $\eta$ ), проведенной для двух типов загрязнений — крупнодисперсного электрокорунда и мелкодисперсного карбида кремния — представлены на рис. 3 и 4. Они показывают следующее:

– применение только центробежного воздействия (импульсный разгон ФП до 1000 об/мин) показывает низкую эффективность: для электрокорунда  $\eta \approx 20\%$ , а для карбида кремния — лишь около 2 %;

– комбинирование центробежного воздействия с вибрацией (амплитуда 1 мм, частота 70 Гц) приводит к синергетическому эффекту. Эффективность регенерации для электрокорунда возрастает до 80 %, а для карбида кремния — до 60 %.

На рис. 3 и 4 приведены также расчетные кривые, полученные по разработанной модели, основанной на балансе сил (1). Как для электрокорунда, так и для карбида кремния наблюдается удовлетворительное качественное и количественное соответствие модели экспериментальным точкам. Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями эффективности регенерации не превышает 15–20 %, что является приемлемой точностью для инженерных расчетов динамики процесса.

**Обсуждение.** Полученные результаты позволяют проанализировать физические механизмы, лежащие в основе процесса регенерации, и оценить границы применимости разработанной модели.

1. Анализ эффективности различных режимов регенерации. Существенное различие в эффективности центробежного воздействия для электрокорунда (20 %) и карбида кремния (2 %) полностью согласуется с теорией адгезии. Для более мелких частиц карбида кремния (60–80 мкм) отношение адгезионных сил к массе частицы (следовательно, и к инерционным силам) значительно выше, чем для крупных частиц электрокорунда (200–250 мкм). Таким образом, одного лишь центробежного усилия недостаточно для преодоления адгезионных связей мелкодисперсного осадка.

2. Природа синергетического эффекта. Достижение эффективности 60–80 % при комбинированном воздействии подтверждает гипотезу о различных и взаимно дополняющих механизмах разрушения слоя. Центробежная сила создаёт преимущественно радиальное отрывающее усилие. Вибрация, в свою очередь, индуцирует тангенциальные сдвиговые напряжения в толще осадка и снижает силу трения между частицами и поверхностью ФП за счёт микросмещений. Совместное действие указанных факторов обеспечивает более полное разрушение адгезионных связей.

3. Верификация расчётной модели. Расхождение между расчётными и экспериментальными данными в пределах 15–20 % свидетельствует об адекватности предложенного подхода, основанного на балансе сил. Основным источником погрешности, по всей видимости, связан со сложностью точного определения адгезионных сил ( $F_n$ ,  $F_t$ ) для конкретной пары «материал частицы — материал ФП». Достигнутая точность является удовлетворительной для инженерных расчётов, целью которых служит не абсолютный прогноз, а сравнительный анализ режимов и выбор оптимальных параметров.

4. Практическая значимость и ограничения. Результаты доказывают, что комбинированный метод позволяет увеличить ресурс ФП по сравнению с использованием только центробежного эффекта. Основное практическое ограничение — необходимость экспериментального определения адгезионных характеристик для новых типов загрязнений, поскольку их теоретический расчёт сопряжён со значительной неопределённостью. Помимо этого, модель была валидирована для водных суспензий; её применение к вязким или неньютоновским жидкостям требует дополнительных исследований с учётом изменения гидродинамических и адгезионных условий.

**Заключение.** В ходе проведенного исследования достигнута поставленная цель: экспериментально и теоретически обоснована эффективность комбинированного центробежно-вибрационного метода регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Установлено, что раздельное применение центробежного воздействия (скорость вращения до 1000 об/мин) характеризуется низкой эффективностью регенерации (2–20 %), особенно для мелкодисперсных частиц с высокой удельной адгезией.

2. Доказан возрастающий эффект от комбинирования вращения ФП с вибрационным воздействием (амплитуда 1 мм, частота 70 Гц), что позволяет повысить эффективность регенерации до 60 % для карбида кремния и до 80 % для электрокорунда.

3. Разработана и экспериментально верифицирована расчетная модель, основанная на балансе удерживающих и отрывающих сил. Модель позволяет с приемлемой для инженерной практики точностью (погрешность  $\leq 20\%$ ) прогнозировать эффективность регенерации и подбирать оптимальные параметры (скорость вращения, частота и амплитуда вибрации) в зависимости от дисперсного состава и природы загрязнений.

4. Критически важным для точности модели является учет адгезионных свойств частиц, что определяет необходимость их экспериментального определения для конкретных условий фильтрации.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются адаптация методики для реологически сложных сред (нефтепродукты, пульпы), а также минимизация энергопотребления системы вибровозбуждения. Запланировано проведение дополнительных испытаний разработанного гидродинамического вибрационного фильтра [20] в условиях, моделирующих реальные промышленные процессы. Полученные результаты создают основу для разработки высокоэффективных фильтровальных систем для химической, нефтехимической и водоочистной отраслей.

### Список литературы / References

1. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка методики расчета комбифильтра. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>
1. Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of a Calculation Method for a Combined Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>
2. Ильющенко А.Ф., Черняк И.Н., Жегздринь Д.И., Илюкевич А.И., Кусин А.Р., Кусин Р.А. и др. Регенерация порошковых фильтрующих элементов в процессе фильтрации водной суспензии гидрогумата торфа. В: *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: Материалы международной научно-практической конференция «Белагро-2018»*. Минск: БГАТУ, 2018. С. 168–172. URL: <http://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4523/1/Regeneraciya-poroshkovyh-filtruyushchih-ehlementov.pdf> (дата обращения 13.04.2026).
2. Ilyushchenko AF, Chernyak IN, Zhegzdrin' DI, Ilyukevich A.I., Kusin A.R., Kusin R.A et al. Regeneration of Powder Filter Elements during Filtration of Aqueous Suspension of Peat Hydrohumate. In: – *Modern Problems of Mastering New Equipment, Technologies, and Organization of Technical Services in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Belagro-2018”*. Minsk: BSATU, 2018. P. 168–172. (In Russ.) <http://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4523/1/Regeneraciya-poroshkovyh-filtruyushchih-ehlementov.pdf> (accessed: 13.04.2026)
3. Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями. *Инженерная практика*. 2010;2:6–13.
3. Kamaletdinov RS, Lazarev AB. An Overview of Existing Methods of Combating Mechanical Impurities. *Engineering Practice*. 2010;2:6–13. (In Russ.)
4. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Эффективность сепарации взвешенных примесей вращающимся фильтроэлементом. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. 2011;10:3–9.
4. Mochalin EV, Mochalina IG. Efficiency of Separating Suspended Impurities with a Rotating Filter Element. *Vestnik National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2011;10:3–9. (In Russ.)
5. Бревнов А.А. Совершенствование гидродинамических фильтров за счет закрутки потока в кольцевой области снаружи фильтроэлемента: дис. ... канд. полит. наук. Сумы, Сумской государственный университет, 2009. 165 с.
5. Brevnov AA. *Improvement of Hydrodynamic Filters by Swirling the Flow in the Annular Region outside the Filter Element*. Cand. Sci. (Polit.), diss. Sumy, Sumy State University, 2009. 165 p. (In Russ.)
6. Frolov NP, Devisilov VA. Investigation of the Pressure Drop on the Filtration and Protective Baffles of a Hydrodynamic Vibration Filter Using ANSYS CFX. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;815:012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012008>
7. Белоков А.А. Фильтр с непрерывной регенерацией. Патент RU 2 651 210, B01D 46/00, 2006 г.
7. Belukov AA. *Filter with Continuous Regeneration*. RF Patent 2 651 210, B01D 46/00. 2006. (In Russ.)
8. Konstantinos Hatzikostanitis. *Using High Frequency Vibration for Operational Improvement of Membrane Filtration Process*. Patent, WO2015198080A1, 2015.
9. Фетисова Е.Г., Голованчиков А.Б., Милова Д.А. Перспективные конструкции фильтрующих центрифуг для псевдопластических жидкостей. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2010; 3(1):86–88. URL: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/9/2010-01.pdf> (дата обращения 13.04.2026).
9. Fetisova EG, Golovanchikov AB, Milova DA. The Centrifugal Dryer Long-Range Design for Pseudoplastic Fluids. *Izvestia VSTU*. 2010;3(1):86–88. (In Russ.) URL: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/9/2010-01.pdf> (accessed: 13.04.2026).
10. Девисилов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Исследование гидродинамического вибрационного фильтрования и разработка конструкции фильтра. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012;14(1-3):866–876. URL: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_866\\_876.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_866_876.pdf) (дата обращения 13.04.2026)
10. Devisilov VA, Myagkov IA, Sharay EYu. Investigation of Hydrodynamic Vibrational Filtering and Development of Construction of a Filter. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1–3):866–876. (In Russ.) URL: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_866\\_876.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_866_876.pdf) (accessed: 13.04.2026)

11. Панов Ю., Белых О.Н., Зинковский А.В., Момотов В.С. Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок. *Вестник ВГУИТ*. 2015;1:175–179.

Panov SY, Belyh ON, Zinkovskii AV, Momotov VS. Features of the Regeneration Process of the Filter. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015;1:175–179. (In Russ.)

12. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Эффективность регенерации целевого фильтра. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015;8(1):99–105.

Zykova YA, Samokhvalov NM, Vinogradov VV. Slotted Filter Regeneration Efficiency. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2015;8(1):99–105. (In Russ.)

13. Xiao Hu, Xinyu Li, Sanchuan Yu, Peifeng Lin, Zuchao Zhu. Hydrodynamic Effects of the Flow-Induced Vibrations on the Mass Transfer and Permeate Flux in a Desalination Membrane. *Desalination*. 2023;564:116710. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116710>

14. Фролов Н.П. Применение вибрации для регенерации фильтровального материала. *Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, Кемерово, 21–23 ноября 2023 года*. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 306-1–306-7.

Frolov NP. The Use of Vibration to Regenerate Filter Material. In: *Life Safety of Enterprises in Industrially Developed Regions: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 21–23 November, 2023*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2023. P. 306-1–306-7. (In Russ.)

15. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. Издательство «Химия», М., 1971 г. 440 с. URL: <https://djuv.online/file/ouPBj3waRovON?ysclid=mnx4lh5goh883436464> (дата обращения 13.04.2026)

Zhuzhikov VA. *Filtering. Theory and Practice of Suspension Separation*. Moscow: Khimiya Publishing House; 1971. 440 p. (In Russ.) URL: <https://djuv.online/file/ouPBj3waRovON?ysclid=mnx4lh5goh883436464> (accessed: 13.04.2026)

16. Девисилов В.А., Фролов Н.П. Использование вибрации для интенсификации очистки проницаемой перегородки гидродинамического фильтра. *Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2023: Сборник трудов девятого международного экологического конгресса (одинадцатой международной научно-технической конференции), Самара – Тольятти, 20–24 сентября 2023 года*. Самара–Тольятти: Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 2023. С. 127–136.

Devisilov VA, Frolov NP. Theoretical Approaches to Calculating the Required Vibration Intensity for Regeneration of the Filter Baffle. In: *Proceedings of the Ninth International Environmental Congress (Eleventh International Scientific Technical Conference) Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes ELPIT 2023, Samara–Togliatti, September 20–24, 2023*. Samara–Tolyatti: Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2023. P. 127–136. (In Russ.)

17. Девисилов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. *Безопасность в техносфере*. 2020;9(2):43–48. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

Devisilov VA, Novikov YuM, Bolshakov VA. Combined Porous Mesh Metals and Products Made from Them. *Safety in Technosphere*. 2020;9(2):43–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

18. Девисилов В.А., Фролов Н.П. Моделирование сепарации механических частиц в гидродинамическом фильтре при очистке воды. *Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии*. 2024;1:88–98.

Devisilov VA., Frolov NP, Simulation of Separation of Mechanical Particles in a Hydrodynamic Filter. *The Legacy of V.I. Vernadsky and Modern Problems of Ecology*. 2024;1:88–98. (In Russ.)

19. Сираев Р.Р. Фильтрация жидкости в пористой среде Форштеймера с пространственно неоднородными пористостью и проницаемостью. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019;12(3):281–292.

Siraev RR. Fluid Transport in Forchheimer Porous Medium with Spatially Varying Porosity and Permeability. *Computational Continuum Mechanics*. 2019;12(3):281–292. (In Russ.)

20. Девисилов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Патент на полезную модель № 150506 УИ «Фильтр гидродинамический вибрационный». Патент РФ, № 2014131794/05. 2015.

Devisilov VA, Myagkov IA, Sharai EYu. *Utility Model Patent No. 150506 U1 “Hydrodynamic Vibration Filter”*. RF Patent, No. 2014131794/05. 2015. (In Russ.)

#### Об авторах:

**Владимир Аркадьевич Девисилов**, к.т.н., доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

**Никита Платонович Фролов**, аспирант кафедры «Экология и промышленная безопасность» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#)

***Заявленный вклад соавторов:***

**В.А. Девисилов:** Разработка концепции; проведение исследования; разработка методологии; научное руководство; написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

**Н.П. Фролов:** Разработка концепции; проведение исследования; разработка методологии; написание черновика рукописи.

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

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Authors:***

**Vladimir A. Devisilov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya St., building 1, Moscow, 105005, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

**Nikita P. Frolov**, Postgraduate Student of the Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya St., building 1, Moscow, 105005, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#)

***Claimed Contributorship:***

**VA Devisilov:** conceptualization, investigation, methodology, supervision, writing – review & editing.

**NP Frolov:** conceptualization, investigation, methodology, writing – original draft preparation.

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

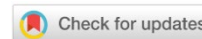
**Поступила в редакцию / Received** 12.02.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 15.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 21.03.2026

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

### Особенности взаимодействия красителя «метиленовый голубой» с сорбционным материалом, полученным на основе отхода регенерации машинных масел

Я.А. Мурзаханов, Ж.А. Сапронова , С.В. Свергузова ,А.В. Святченко  

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация

✉ [sv.anastasiaa@mail.ru](mailto:sv.anastasiaa@mail.ru)

EDN: WXGMMV

#### Аннотация

**Введение.** В условиях нарастающего загрязнения водных ресурсов органическими соединениями, в частности синтетическими красителями, актуальной задачей является разработка эффективных, экономически доступных и экологически безопасных сорбционных материалов. Несмотря на широкое применение активированных углей, глин и органоминеральных композитов, сохраняется необходимость поиска недорогих сорбентов на основе промышленных отходов. Перспективным направлением является использование глинистых шламов, образующихся при регенерации машинных масел, хотя их сорбционные свойства остаются недостаточно изученными. Целью настоящей работы было получение и исследование сорбционных характеристик материала на основе глинистого шламового отхода при удалении метиленового голубого из водных растворов.

**Материалы и методы.** Сорбционный материал получали путём термической обработки замасленного глинистого шлама при различных температурах с выбором оптимального режима. Пористую структуру исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота, применяя модели БЭТ, t-Plot и ВЖН. Сорбционные свойства оценивали на модельных растворах метиленового голубого фотоколориметрическим методом при длине волны 670 нм. Адсорбционную ёмкость и эффективность очистки рассчитывали стандартными методами, а изотермы сорбции аппроксимировали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича.

**Результаты исследования.** Установлено, что образец, термообработанный при 400 °С (ГШ400), обладает развитой мезопористой структурой с удельной поверхностью 69,148 м<sup>2</sup>/г и общим объёмом пор 0,159 см<sup>3</sup>/г. Средний диаметр пор составляет примерно 4–6 нм, микропоры отсутствуют. Материал демонстрирует высокую активность в адсорбции метиленового голубого, обеспечивая эффективное обесцвечивание растворов с максимальной сорбционной ёмкостью 0,139 ммоль/г (44,8 мг/г). Процесс сорбции наиболее адекватно описывается моделью Ленгмюра ( $R^2 = 0,9645$ ), указывая на монослойный характер адсорбции. Рассчитанная энергия адсорбции (9,608 кДж/моль) свидетельствует о преобладании физического механизма взаимодействия.

**Обсуждение.** Полученные результаты показывают, что высокая сорбционная активность обусловлена формированием мезопористой структуры в процессе термообработки. Преобладание пор диаметром 4–6 нм обеспечивает доступность активной поверхности для молекул красителя, а наличие гистерезиса указывает на вклад капиллярной конденсации в удержание сорбата. Соответствие модели Ленгмюра свидетельствует об относительной однородности активных центров. Установленный физический характер адсорбции указывает на доминирование слабых межмолекулярных взаимодействий.

**Заключение.** Экспериментально подтверждена возможность эффективного использования термически модифицированного глинистого шламового отхода в качестве сорбента для очистки вод от катионных красителей. Материал ГШ400 обладает высокой сорбционной ёмкостью и обеспечивает эффективное удаление метиленового голубого из водных растворов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения разработанного сорбента в технологиях водоочистки и подчёркивают целесообразность утилизации промышленных отходов для получения функциональных материалов.

**Ключевые слова:** сорбент, очистка воды, сорбционная емкость, утилизация отхода

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Для цитирования.** Мурзаханов Я.А., Сапронова Ж.А., Свергузова С.В., Святченко А.В. Особенности взаимодействия красителя «метиленовый голубой» с сорбционным материалом, полученным на основе отхода регенерации машинных масел. Безопасность техногенных и природных систем. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):142–151. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

Original Empirical Research

## Interaction of Methylene Blue with a Sorption Material Obtained from Engine Oil Regeneration Waste

Yan A. Murzakhanov, Zhanna A. Sapronova , Svetlana V. Sverguzova ,

Anastasia V. Svyatchenko ✉

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

✉ [ivanov\\_ii@mail.ru](mailto:ivanov_ii@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** In light of the increasing pollution of water resources by organic compounds, particularly synthetic dyes, it is a pressing issue to develop effective, affordable, and environmentally friendly sorption materials. Despite the widespread use of activated carbons, clays, and organomineral composites, there remains a need to find low-cost sorbents based on industrial waste. One promising approach is the use of clay sludge generated during the regeneration of machine oil, but their sorption properties have not been sufficiently studied. The aim of this research was to obtain and characterize the sorption characteristics of a material based on clay sludge waste during the removal of methylene blue from aqueous solutions.

**Materials and Methods.** The sorption material was obtained by thermal treatment of oily clay sludge at various temperatures, with the optimal mode selected. Pore structure was studied by low-temperature nitrogen adsorption using BET, t-Plot, and BJH models. Sorption properties were evaluated using model methylene blue solutions and photocolometry at a wavelength of 670 nm. Adsorption capacity and purification efficiency were calculated using standard methods, and sorption isotherms were approximated using the Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich models.

**Results.** It was found that the sample (CS400) heat-treated at 400°C had a developed mesoporous structure with a specific surface area of 69.148 m<sup>2</sup>/g and a total pore volume of 0.159 cm<sup>3</sup>/g. The average pore diameter was approximately 4–6 nm, with no micropores present. The material demonstrated high sorption activity for methylene blue, effectively decolorizing solutions. The maximum sorption capacity reached 0.139 mmol/g (44.8 mg/g). The sorption process was best described by the Langmuir model ( $R^2 = 0.9645$ ), indicating monolayer nature of adsorption. The calculated sorption energy (9.608 kJ/mol) suggested a predominance of physical interaction.

**Discussion.** The results obtained demonstrated that the high sorption activity of the material was due to the formation of a mesoporous structure during heat treatment. Pores with a diameter of 4–6 nm were predominant, which ensured accessibility of the active surface to dye molecules. Hysteresis indicated the contribution of capillary condensation to the sorbate retention process. The compliance with the Langmuir model indicated relative homogeneity of active sites. The established physical nature of adsorption suggested the predominance of weak intermolecular interactions.

**Conclusion.** The feasibility of the effective use of thermally modified clay sludge waste as a sorbent for the purification of water from cationic dyes has been experimentally confirmed. The CS400 material has been shown to have a high sorption capacity, effectively removing methylene blue from aqueous solutions. The obtained results demonstrated the potential of the developed sorbent for use in water treatment technologies and highlighted the feasibility of recycling industrial waste to produce functional materials.

**Keywords:** sorbent, water purification, sorption capacity, waste disposal

**Acknowledgements.** This research was conducted within the framework of the “Priority 2030” Program using the equipment of the High Technology Center of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

**For Citation.** Murzakhanov YaA, Sapronova ZhA, Sverguzova SV, Svyatchenko AV. Interaction of Methylene Blue with a Sorption Material Obtained from Engine Oil Regeneration Waste. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):142–151. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-142-151>

**Введение.** Концепция экологической безопасности заключается в защите населения от экологических опасностей, вызванных природными и антропогенными процессами, предотвращении истощения природных ресурсов и ликвидации растущего разрыва между спросом и предложением экологических благ. Загрязнение и дефицит водных ресурсов относятся к основным угрозам экологической безопасности. Роль чистоты воды для экосистем и здоровья человека невозможно переоценить, поскольку воздействие загрязняющих веществ может привести к серьёзным проблемам со здоровьем у населения и негативно повлиять на продовольственную безопасность [1].

По данным Всемирной организации здравоохранения, около 2 млрд человек в мире используют источники питьевой воды, загрязнённые химическими веществами [2], а к 2030 году глобальный спрос на пресную воду может превысить предложение на 40 % [3]. В промышленно развитых и развивающихся странах наблюдается устойчивая тенденция роста объёмов сточных вод, что усиливает нагрузку на водные экосистемы. Стремительное развитие технологий, промышленности и урбанизации существенно повлияло на состояние водных объектов во всём мире. Сброс сточных вод, содержащих красители из различных отраслей промышленности, представляет собой серьёзную экологическую проблему. Ежегодно в окружающую среду выбрасывается примерно 280 000 т красителей, что приводит к загрязнению водных ресурсов в глобальном масштабе [4]. Текстильная промышленность генерирует огромное количество загрязнённых стоков, содержащих сложную смесь красителей, поверхностно-активных веществ, солей и тяжёлых металлов. Помимо деградации окружающей среды, краситель-содержащие загрязнения оказывают глубокое негативное воздействие на местное население, особенно в развивающихся регионах. Загрязнённые источники воды снижают сельскохозяйственную производительность, наносят ущерб рыболовству и увеличивают расходы на здравоохранение [5].

В последние годы проблема очистки сточных вод от красителей приобретает особую актуальность в связи с ужесточением экологических нормативов и необходимостью достижения Целей устойчивого развития ООН (ЦУР 6 — «Чистая вода и санитария») [6]. Это требует разработки эффективных, экономически доступных и экологически безопасных методов очистки.

Большинство красителей в сточных водах являются гидрофильными и обладают низкой биоразлагаемостью, что делает их устойчивыми к традиционным процессам очистки [7]. Потребление воды или пищи, загрязнённых токсичными красителями, может привести к их биоаккумуляции в организме и долгосрочным проблемам со здоровьем, включая нарушение эндокринной системы, возникновение злокачественных новообразований, снижение иммунитета. Кроме того, многие красители оказывают вредное воздействие на водные организмы, приводя к снижению репродуктивной способности, замедлению роста и увеличению смертности [8].

Красители классифицируются по характеру заряда, который они несут при растворении в водной среде, — на катионные, анионные и неионогенные. Среди них катионные красители, такие как метиленовый голубой (МГ), малахитовый зелёный и кристаллический фиолетовый, широко применяются в текстильной, полиграфической и красильной промышленности, а также в бумажном производстве. МГ с химической формулой  $C_{16}H_{18}N_3ClS$  является распространённым катионным красителем из семейства фенотиазиновых соединений. Он характеризуется стабильной структурой, высокой водной растворимостью и токсичностью. Исследования показали, что сточные воды, содержащие МГ, могут приводить к гибели водных растений и значительному снижению уровня растворённого кислорода в водоёмах [9]. Хотя метиленовый голубой обладает некоторыми лечебными свойствами при безопасном применении в соответствии с клиническими указаниями, они не проявляются при его поступлении в организм через загрязнённую воду. Напротив, в организме человека он может вызывать различные заболевания: цианоз, некроз тканей, желтуху, тахикардию. Известны его негативные эффекты в отношении растений — присутствие метиленового голубого приводит к ингибированию роста и снижению содержания пигментов и белков в микроводорослях *Chlorella vulgaris* и *Spirulina platensis*. Таким образом, неблагоприятные последствия загрязнения сточных вод метиленовым голубым обуславливают необходимость его эффективного удаления перед сбросом [10].

Для удаления красителей из окружающей среды применяются различные методы обработки. Биологические методы являются экологически безопасными и экономичными, но имеют ряд ограничений: низкая скорость процесса, зависимость от условий среды (температура, pH) и ограниченная эффективность в отношении стойких синтетических красителей. Химические методы, такие как углубленное окисление с использованием озона, хлора или персульфатов, могут эффективно разрушать красители, однако требуют дорогостоящих реагентов и часто сопровождаются образованием побочных токсичных веществ. Кроме того, химическая очистка связана с высокими энергетическими затратами и требует дорогостоящего оборудования, что ограничивает её практическое применение. Адсорбция является эффективным и экологически устойчивым методом очистки воды благодаря экономичности и возможности регенерации сорбентов. Разработка недорогих высокоэффективных адсорбентов остаётся актуальной задачей [11].

В качестве сорбентов используются материалы, такие как рисовая шелуха, биоуголь, полученный из растительных отходов, активированные отходы банановой кожуры и другие [12]. В работе [13] для удаления метиленового голубого предложен геополимер на основе частично dealюминированного метакаолина. Показано, что адсорбция зависит от pH, времени контакта и концентрации красителя, а максимальная сорбционная ёмкость составила 8 мг/г. Процесс описывается моделью Фрейндлиха, что указывает на гетерогенную поверхность и многослойный характер адсорбции. Несмотря на экологичность и низкую стоимость, полученные материалы характеризуются сравнительно невысокой сорбционной ёмкостью. В работе [14] установлено, что активированный уголь, синтезированный из стручков *Denolix Regia* с последующей активацией хлоридом цинка и фосфорной кислотой, обеспечивает степень удаления метиленового голубого до 99,9 %. Адсорбция протекает преимущественно по физическому механизму и описывается моделями Ленгмюра и Фрейндлиха. Несмотря на высокую эффективность, получение материала требует сложной химической активации и значительных энергетических затрат.

Глины используются в качестве эффективной альтернативы для удаления анионных и катионных красителей благодаря высокой ионообменной способности, удельной поверхности, низкой стоимости и экологичности. Вместе с тем они имеют недостатки: трудная регенерация, ограниченная селективность и необходимость химической модификации для оптимизации эффективности удаления.

Многочисленные исследования органоминеральных материалов в адсорбции красителей подтверждают их высокую сорбционную способность, поскольку они обладают уникальными структурными свойствами, что делает эти материалы перспективными недорогими и экологически чистыми адсорбентами [15]. Особое внимание уделяется модификации глинистых сорбентов. В работе [16] показано, что активация бентонита раствором NaOH позволяет увеличить удельную поверхность до 74,15 м<sup>2</sup>/г и достичь сорбционной ёмкости 22,131 мг/г. При этом адсорбция является самопроизвольным процессом, а сорбенты сохраняют работоспособность в течение нескольких циклов регенерации. Однако использование концентрированных щелочных растворов усложняет технологию и повышает её стоимость.

Синтезирован композит из активированного бентонита и рапсовой соломы методом гидротермальной карбонизации с последующей пропиткой FeCl<sub>3</sub> и обработкой NaOH. Композит показал превосходную адсорбционную способность (425,65 мг/г при нейтральном pH) по сравнению с исходным биоуглем. Несмотря на высокие показатели, многостадийность синтеза (гидротермальная обработка, химическая модификация) ограничивает масштабируемость и повышает стоимость производства [17].

Анализ современных исследований показывает, что, несмотря на высокую эффективность ряда адсорбентов, их широкое применение ограничено высокой стоимостью и сложностью получения и активации [18]. Следовательно, органоминеральные материалы на основе глин и глинистых отходов являются перспективными для получения недорогих и эффективных сорбентов удаления красителей из водных сред. Одним из глинистых шламовых отходов является остаток регенерации машинных масел. В развитых странах переработка отработанных масел на специализированных заводах составляет 20-100 тыс. т в год [19]; на каждую тонну очищенного смазочного масла образуется 80-140 кг отработанного минерального сорбента [20].

Несмотря на обнадеживающие результаты исследований по использованию глинистых сорбентов, применение глинистых шламовых отходов регенерации машинных масел для удаления катионных красителей, в частности метиленового голубого, остаётся малоизученным. По этой причине целью настоящей работы является получение и экспериментальное исследование сорбционных характеристик материала на основе глинистого шламового отхода при удалении метиленового голубого.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- получить сорбционный материал путём термической обработки замасленной глины при различных температурах и определить оптимальные условия его формирования;
- охарактеризовать пористую структуру полученного сорбента;
- оценить сорбционные свойства материалов, полученных при различных температурах, и выделить оптимальный образец;
- определить максимальную сорбционную ёмкость выбранного сорбента, построить изотермы адсорбции и оценить характер адсорбционного процесса.

**Материалы и методы.** Исходная глина, составляющая основу глинистого шлама (ГШ), согласно документации поставщика, содержит до 30 % клиноптилолита, до 30 % монтмориллонита, около 20 % кальцита, 11 % кварца и 9 % прочих примесей при насыпной плотности 0,65-0,75 г/см<sup>3</sup> и истинной плотности 2,3 г/см<sup>3</sup>.

Сорбционный материал был получен путём термической модификации замасленного глинистого шлама, образуемого при сорбционной регенерации отработанных машинных масел. Термообработка проводилась в муфельной печи «Lior LF-7/13-G2» (РФ).

При температуре 200 °С глинистый отход сохранял резкий запах и комковатую структуру. При 400 °С исходная пастообразная масса превратилась в рыхлый чёрный материал (образец ГШ400). Повышение температуры до 500 °С обусловило осветление окраски вследствие выгорания органических компонентов.

Для оценки особенностей распределения пор и определения удельной поверхности применялись методы математической обработки адсорбционных изотерм. Пористую структуру образцов исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе TriStar 3020 (Micromeritics, США). Удельную поверхность рассчитывали по методу Брунауэра-Эммета-Тейлора (БЕТ). Объём микропор определяли методом t-Plot статистической толщины адсорбционного слоя, основанным на сравнении экспериментальной и эталонной изотерм адсорбции [21]. Объём мезопор определяли методом Баррета-Джойнера-Халенды (ВН). Рабочие растворы метиленового голубого готовили растворением точной навески красителя в дистиллированной воде. Концентрацию красителя в растворах до и после очистки определяли фотоколориметрически при длине волны 670 нм с использованием фотоколориметра «КФК-3-01» (Россия). Очистку модельных растворов проводили следующим образом: 100 см<sup>3</sup> раствора вносили в коническую колбу вместимостью 250 см<sup>3</sup>, добавляли расчётную навеску сорбента, смесь перемешивали в течение заданного времени и затем отстаивали.

Эффективность очистки вычисляли по формуле (1):

$$\Xi = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{нач}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\Xi$  — эффективность, %;  $C_{\text{нач}}$  и  $C_{\text{кон}}$  — концентрации загрязняющих веществ в системе, мг/дм<sup>3</sup>, до и после очистки, соответственно.

Адсорбционную емкость рассчитывали по формуле (2):

$$A = \frac{C_n - C_p \cdot V}{G}, \quad (2)$$

где  $A$  — сорбционная емкость, мг/г;  $C_n$  — концентрация красителя до очистки, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_p$  — равновесная концентрация красителя в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $V$  — объем раствора МГ, дм<sup>3</sup>;  $G$  — масса сорбционного материала, г.

**Результаты исследования.** Изотерма низкотемпературной сорбции азота представлена на рис. 1.

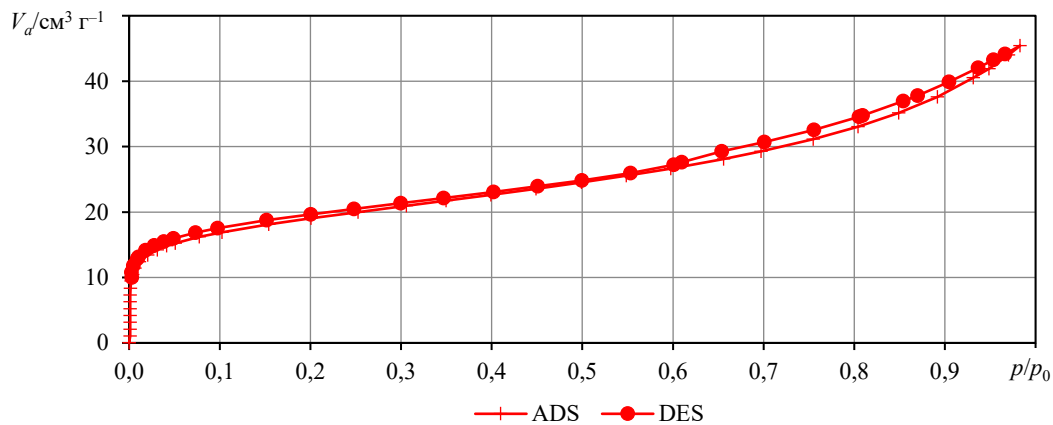


Рис. 1. Изотерма низкотемпературной сорбции азота на поверхности ГШ<sub>400</sub>: ADS — изотерма адсорбции; DES — изотерма десорбции

Как следует из рис. 1, форма изотермы соответствует IV типу согласно классификации [22], что указывает на протекание полимолекулярной сорбции в мезопорах, осложнённой явлениями капиллярной конденсации, поскольку наблюдается небольшая петля гистерезиса. Величина удельной поверхности составила 69,148 м<sup>2</sup>/г, общий объём пор — 0,159 см<sup>3</sup>/г. Согласно полученным данным, микропоры в исследуемом сорбенте отсутствуют.

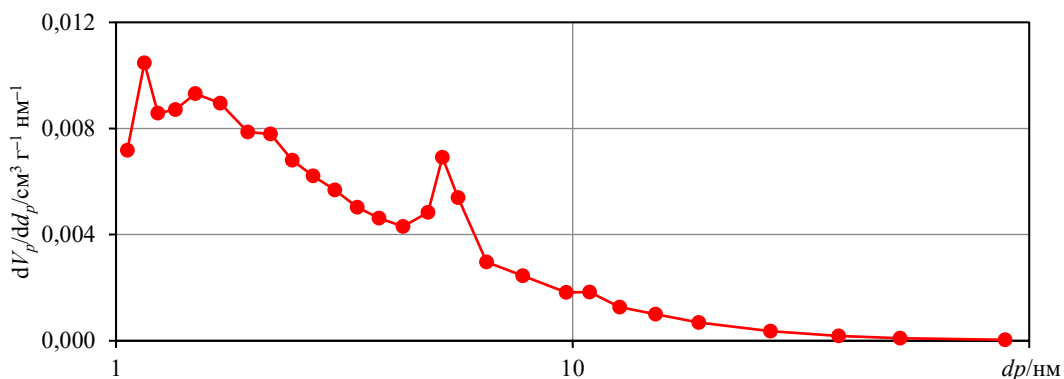


Рис. 2. Изотерма адсорбции азота, рассчитанная по методу ВН

Как видно из рис. 2, объём мезопор составляет  $0,061 \text{ см}^3/\text{г}$ , средний диаметр пор —  $4,22 \text{ нм}$ , медианный —  $5,69 \text{ нм}$ . Это свидетельствует о формировании достаточно однородной мезопористой структуры, благоприятной для процессов сорбции органических соединений.

Для оценки сорбционных свойств ГШ<sub>400</sub> проводились эксперименты с модельным красителем — метиленовым голубым. На рис. 3 представлены результаты экспериментов. Исходная концентрация красителя составила  $30 \text{ мг}/\text{дм}^3$ , количество добавки сорбционного материала —  $1 \text{ г}/100 \text{ см}^3$  раствора.

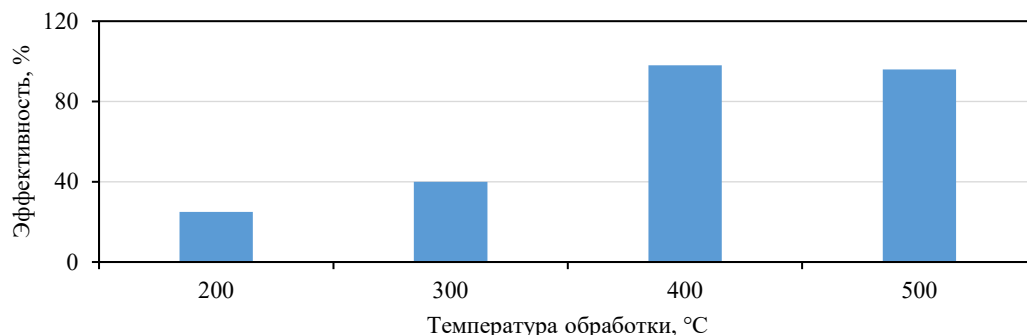


Рис. 3. Обесцвечивание растворов красителя метиленовый голубой сорбционными материалами

Как видно из рис. 3, исследуемый материал демонстрирует выраженную способность к обесцвечиванию раствора, что свидетельствует о его высокой сорбционной активности по отношению к органическим красителям.

Для более детального изучения сорбционных процессов на поверхности материала ГШ<sub>400</sub> была построена адсорбционная изотерма (рис. 4). Исходная концентрация красителя составляла  $0,313 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$ , масса сорбента изменялась от  $1$  до  $8 \text{ г}/\text{дм}^3$ .

Согласно данным рис. 4, максимальная сорбционная ёмкость материала достигает  $0,139 \text{ ммоль}/\text{г}$ , что характеризует ГШ<sub>400</sub> как эффективный сорбент для удаления метиленового голубого из водных растворов.

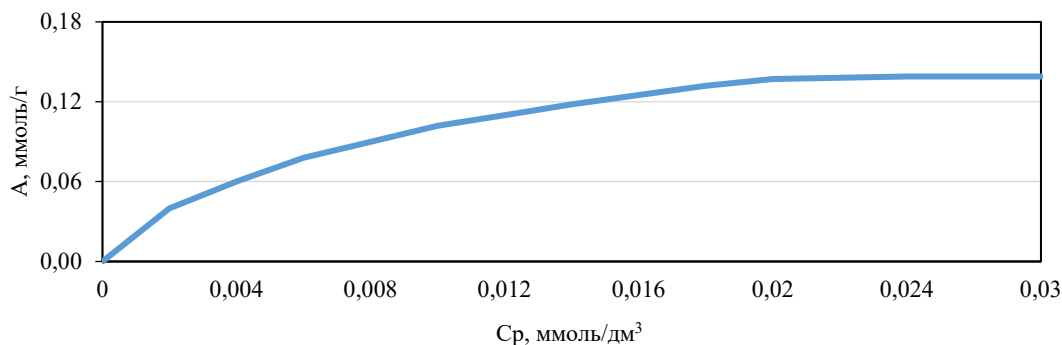


Рис. 4. Изотерма адсорбции метиленового голубого на ГШ<sub>400</sub>

Согласно данным рис. 4, максимальная сорбционная ёмкость материала достигает  $0,139 \text{ ммоль}/\text{г}$ .

Экспериментальную изотерму аппроксимировали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. На основе этой обработки построены изотермы (рис. 5-7), определены уравнения регрессии и рассчитаны соответствующие коэффициенты (таблицы 1-3).

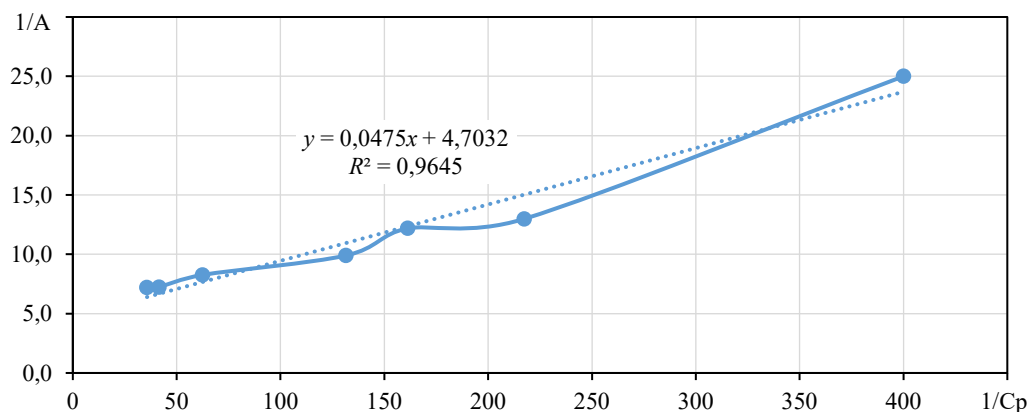


Рис. 5. Изотерма Ленгмюра для сорбции метиленового голубого на ГШ<sub>400</sub>

Таблица 1

Константы Ленгмюра

$1/A = 1/A_{\infty} + 1/(K_L A_{\infty} C_p)$			
$y = 4,7032 + 0,0475x$			
$1/A_{\infty} =$	4,70316	$1/(K_L A_{\infty}) =$	0,04749
$A_{\infty} =$	0,21262	$K_L =$	99,02873

Коэффициент корреляции модели Ленгмюра  $R = 0,982097293$ .

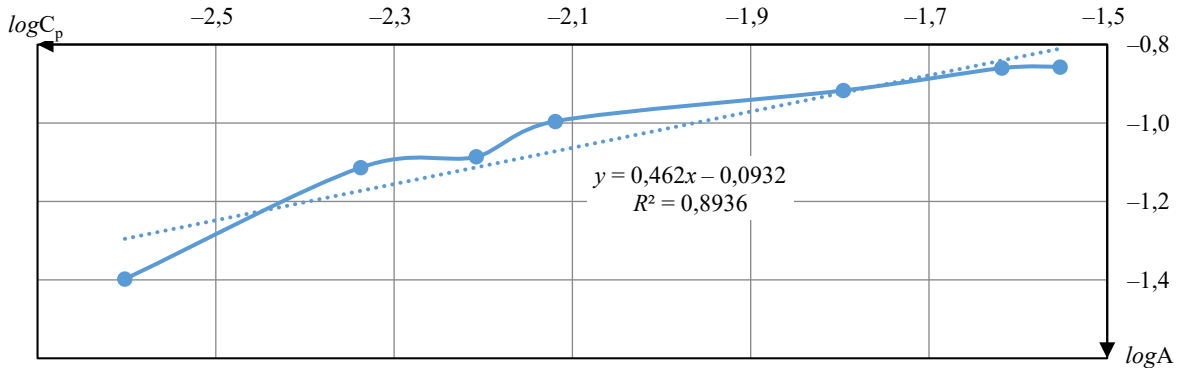


Рис. 6. Изотерма Фрейндлиха для сорбции метиленового голубого на ГШ<sub>400</sub>

Таблица 2

Константы Фрейндлиха

$\log A = \log K_F + 1/n \log C_p$			
$y = -0,0932 + 0,462x$			
$\log K_F =$	-0,09316	$1/n =$	0,46200
$K_F =$	0,80695	$n =$	2,16450

Коэффициент корреляции модели Фрейндлиха  $R = 0,945298744$ .

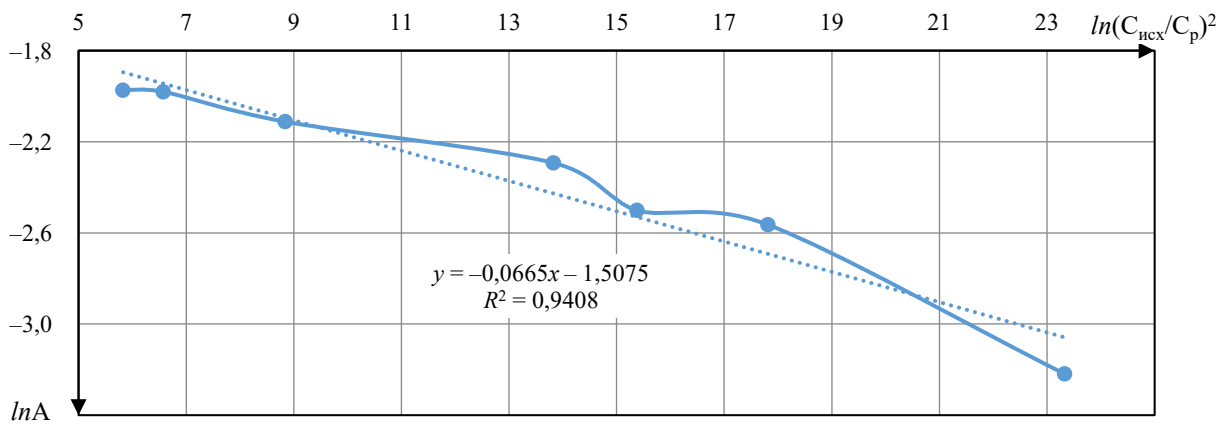


Рис. 7. Изотерма Дубинина-Радушкевича для сорбции метиленового голубого на ГШ<sub>400</sub>

Таблица 3

Константы Дубинина-Радушкевича

$\ln A = \ln A_{\infty} - (R^*T/E)^2 * (\ln(C_{исх}/C_p))^2$			
$y = -1,5075 - 0,0665x$			
$\ln A_{\infty} =$	-1,50751	$(R^*T/E)^2 =$	0,06649
$A_{\infty} =$	0,22146	$E =$	9608,69551

Коэффициент корреляции модели Дубинина-Радушкевича  $R = -0,969934818$ .

Из различных моделей изотерм равновесной и неравновесной сорбции или сорбционных характеристик наиболее популярными являются модели Ленгмюра и Фрейндлиха.

Как видно из полученных данных, процесс сорбции метиленового голубого на ГШ<sub>400</sub> лучше всего описывается моделью Ленгмюра (коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9645$ ). Следовательно, сорбция имеет монослойный характер. Константа Ленгмюра равна 99,02873, отсюда можно определить значение  $R_L$  по формуле (3):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}, \quad (3)$$

где  $K_L$  — константа Ленгмюра,  $C_0$  — начальная концентрация адсорбата.

Рассчитанное значение параметра составило 0,031, что подтверждает благоприятный характер процесса. Величина  $1/n$  в модели Фрейндлиха (0,462) указывает на эффективную адсорбцию, а энергия адсорбции  $E$ , рассчитанная по модели Дубинина-Радушкевича (9,608 кДж/моль), соответствует физическому механизму сорбции.

**Обсуждение.** Полученные результаты показывают, что глинистый шлам, обработанный при температуре 400 °С, демонстрирует высокую эффективность очистки растворов. Материал, полученный при повышенной температуре, также проявляет значительную сорбционную активность, однако его синтез требует дополнительных энергозатрат. Оптимальная температура термообработки обеспечивает баланс между результативностью процесса и экономической целесообразностью.

Высокая сорбционная активность образца ГШ400 обусловлена особенностями его пористой структуры. Преобладание мезопор с диаметром ~4-6 нм обеспечивает доступность активной поверхности для молекул метиленового голубого, что соответствует известным представлениям о механизме адсорбции органических красителей на мезопористых материалах.

Классификация изотермы как IV типа и наличие гистерезисной петли свидетельствуют о капиллярной конденсации, способствующей удержанию молекул сорбата в порах. Аналогичные закономерности отмечены в литературе для глинистых и алюмосиликатных сорбентов [23], где развитая мезопористая структура рассматривается как определяющий фактор повышения эффективности очистки [24].

Анализ моделей адсорбции показал, что процесс наиболее полно описывается уравнением Ленгмюра, указывая на монослойный характер адсорбции на поверхности сорбента. Это может быть связано с относительной однородностью активных центров, образованных в ходе термообработки.

Рассчитанное значение энергии адсорбции (9,608 кДж/моль) позволяет отнести процесс к физической адсорбции, что означает взаимодействие между сорбатом и сорбентом посредством слабых межмолекулярных сил (ван-дер-Ваальса), типичное для систем «органический краситель – минеральный сорбент».

К ограничениям исследования можно отнести использование единственного модельного загрязнителя и отсутствие анализа влияния сопутствующих факторов (рН среды, ионной силы раствора, присутствия конкурирующих веществ). Указанные параметры могут существенно влиять на механизм и результативность адсорбции в реальных условиях.

**Заключение.** Таким образом, доказана возможность применения отхода регенерации машинных масел (глинистого шлама) в качестве эффективного сорбента для извлечения красителя «Метиленовый голубой».

Установлено, что термообработанный глинистый шлам (ГШ<sub>400</sub>) обладает развитой мезопористой структурой (объем пор 0,159 см<sup>3</sup>/г) и демонстрирует сорбционную емкость по метиленовому голубому 0,139 ммоль/г (44,8 мг/г).

Показано, что процесс сорбции носит монослойный характер и преимущественно описывается моделью Ленгмюра, а энергия адсорбции (9,608 кДж/моль) указывает на физический механизм взаимодействия.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что ГШ400 может служить доступным и эффективным сорбентом для очистки сточных вод от органических красителей. Особое значение имеет его применение в контексте утилизации отходов, что повышает экологическую и хозяйственную целесообразность предложенного подхода.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий водоочистки, а также в дальнейших исследованиях, направленных на оптимизацию условий термообработки и расширение спектра удаляемых загрязнителей.

#### Список литературы / References

1. Ejiohuo O, Onyeaka H, Akinsemolu A, Nwabor OF, Siyanbola KF, Tamasiga P. Ensuring Water Purity: Mitigating Environmental Risks and Safeguarding Human Health. *Water Biology and Security*. 2025;4(2):100341. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100341>
2. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization; 2022. 614 p.
3. *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; 2023. 189 p.
4. Kusumlata, Balram Ambade, Ashish Kumar, Sneha Gautam. Sustainable Solutions: Reviewing the Future of Textile Dye Contaminant Removal with Emerging Biological Treatments. *Limnological Review*. 2024;24(2):126–149. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24020007>

5. Kavitha G, Govindhan M, Premkumar S. Dye Pollution and Its Implications for Human Health, Aquatic Ecosystems, and Sustainable Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *Journal of Water Process Engineering*. 2025;80:109071. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109071>
6. *The Sustainable Development Goals Report: Special Edition*. United Nations; 2023. 80 p.
7. Parida VK, Singh N, Priyadarshini M, Kumari P, Datta D, Tambi A. Insights into the Synthetic Dye Contamination in Textile Wastewater: Impacts on Aquatic Ecosystems and Human Health, and Eco-Friendly Remediation Strategies for Environmental Sustainability. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2025;150:247–264. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.04.019>
8. Khandelwal D, Rana I, Mishra V, Ranjan KR, Singh P. Unveiling the Impact of Dyes on Aquatic Ecosystems through Zebrafish – A Comprehensive Review. *Environmental Research*. 2024;261:119684. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119684>
9. Jing Hong, Jia Bao, Yang Liu. Removal of Methylene Blue from Simulated Wastewater Based upon Hydrothermal Carbon Activated by Phosphoric Acid. *Water*. 2025;17(5):733. <https://doi.org/10.3390/w17050733>
10. Oladoye PO, Ajiboye TO, Omotola EO, Oyewola OJ. Methylene Blue Dye: Toxicity and Potential Elimination Technology from Wastewater. *Results in Engineering*. 2022;16(6):100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
11. Zhuangzhuang Yang, Yongjun Liu, Rushuo Yang, Bingrui Shi, Pan Liu, Lu Yang. Development and Application of Metal-Organic Frameworks and Spherical Carbon Particles for Efficient Recovery of Phenols and Oils from Coal Chemical Wastewater: A New Full-Process Adsorption Treatment Mode. *Chemical Engineering Journal*. 2024;498:155219.
12. Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А., Святченко А.В. Сорбционные свойства листового опада платана по отношению к красителю метиленовому голубому. *Chemical Bulletin*. 2020;3(4):5–13.  
Sverguzova SV, Shaykhiev IG, Sapronova ZhA, Svyatchenko AV. Sorption Properties of Sycamore Leaf Litter in Relation to Methylene Blue Dye. *Chemical Bulletin*. 2020;3(4):5–13. (In Russ.)
13. Elewa K, Tawfic AF, Tarek M, Al-Sagheer NA, Nagy NM. Removal of Methylene Blue from Synthetic Industrial Wastewater by Using Geopolymer Prepared from Partially Dealuminated Metakaolin. *Scientific Reports*. 2025;15(1):17633. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01461-w>
14. Arumugam Pillai Kanni Raj. Adsorption of Methylene Blue Dye from Textile Industry Effluent using Activated Carbon Synthesized from Various Plant-Based Precursors. *Oriental Journal of Chemistry*. 2025;41(2):665–674. <https://doi.org/10.13005/ojc/410236>
15. Carhuarupay-Molleda YF, Ccasa Barboza NM, Pastor-Mina S, Valcarcel Carlos ED, Palomino-Malpartida YG, Redolfo RL, et al. A Study of Methylene Blue Adsorption by a Synergistic Adsorbent Algae (*Nostoc sphaericum*)/Activated Clay. *Polymers*. 2025;17(15):2134. <https://doi.org/10.3390/polym17152134>
16. Hamad Noori Hamad, Syazwani Idrus, Badronnisa Yusuf, Nur Syakina Jamali, Amimul Ahsan, Sri Suhartini, et al. Optimized Bentonite Clay Adsorbents for Methylene Blue Removal. *Processes*. 2024;12(4):738. <https://doi.org/10.3390/pr12040738>
17. Yiming Zhang, Zhenglong Li, Xueliang Zheng, Yihua Wu, Lijun Wang, Lili Xie. Study on the Adsorption of Methylene Blue Solution by Activated Clay Biochar Composites. *Chemical Engineering Communications*. 2026;213(3):590–602. <https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2567877>
18. Shaobin Wang, Yuelian Peng. Natural Zeolites as Effective Adsorbents in Water and Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2010;156(1):11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
19. Тарасов В.В., Соболенко А.Н., Тарасов М.И. Эффективность применения регенерированного моторного масла легированного присадками в судовых дизелях разной форсировки // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020;1–2(47):116–122.  
Tarasov VV, Sobolenko AN, Tarasov MI. Efficiency of the Application of Regenerated Motor Oil Alloying with Additives in Ship Diesels of Different Forcing. *Marine Intellectual Technologies*. 2020;1–2(47):116–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.37220/MIT.2020.47.1.078>
20. Sabour MR, Shahi M. Spent Bleaching Earth Recovery of Used Motor-Oil Refinery. *Civil Engineering Journal*. 2018;4(3):572–584. <https://doi.org/10.28991/cej-0309116>
21. Galarneau A, Villemot F, Rodriguez J, Fajula F, Coasne B. Validity of the t-Plot Method to Assess Microporosity in Hierarchical Micro/Mesoporous Materials. *Langmuir*. 2014;30(44):13266–13274. <https://doi.org/10.1021/la5026679>
22. Rahman MM, Shafiullah AZ, Pal A, Islam MA, Jahan I, Saha BB. Study on Optimum IUPAC Adsorption Isotherm Models Employing Sensitivity of Parameters for Rigorous Adsorption System Performance Evaluation. *Energies*. 2021;14(22):7478. <https://doi.org/10.3390/en14227478>
23. Tao Du, Li-Feng Zhou, Qi Zhang, Li-Ying Liu, Gang Li, Wen-Bin Luo, et al. Mesoporous Structured Aluminaosilicate with Excellent Adsorption Performances for Water Purification. *Sustainable Materials and Technologies*. 2018;17:e00080. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00080>
24. Auta M, Hameed BH. Modified Mesoporous Clay Adsorbent for Adsorption Isotherm and Kinetics of Methylene Blue. *Chemical Engineering Journal*. 2012;198–199:219–227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.075>

**Об авторах:**

**Ян Артурович Мурзаханов**, аспирант кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [murzahanov94@mail.ru](mailto:murzahanov94@mail.ru)

**Жанна Ануаровна Сапронова**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), [sapronova.2016@yandex.ru](mailto:sapronova.2016@yandex.ru)

**Светлана Васильевна Свергузова**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [pe@bstu.ru](mailto:pe@bstu.ru)

**Анастасия Владимировна Святченко**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная экология» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [sv.anastasiaa@mail.ru](mailto:sv.anastasiaa@mail.ru)

**Заявленный вклад соавторов:**

**Я.А. Мурзаханов:** проведение исследования.

**Ж.А. Сапронова:** разработка концепции.

**С.В. Свергузова:** разработка методологии.

**А.В. Святченко:** формальный анализ.

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

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Yan A. Murzakhanov**, Postgraduate Student of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [murzahanov94@mail.ru](mailto:murzahanov94@mail.ru)

**Zhanna A. Sapronova**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), [sapronova.2016@yandex.ru](mailto:sapronova.2016@yandex.ru)

**Svetlana V. Sverguzova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [pe@bstu.ru](mailto:pe@bstu.ru)

**Anastasia V. Svyatchenko**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Industrial Ecology Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [sv.anastasiaa@mail.ru](mailto:sv.anastasiaa@mail.ru)

**Claimed Contributorship:**

**YuA Murzakhanov:** investigation.

**ZhA Sapronova:** conceptualization.

**SV Sverguzova:** methodology.

**AV Svyatchenko:** formal analysis.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript.**

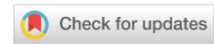
Поступила в редакцию / Received 03.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.04.2026

Принята к публикации / Accepted 07.05.2026

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## MACHINE BUILDING



УДК 621.3; 004.02

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-152-165>

### Интеллектуализация фильтров Калмана для повышения автономности и точности навигационных систем беспилотных летательных аппаратов



EDN: FMTCRW

И.В. Контарев<sup>1</sup>  , В.В. Белик<sup>2</sup> <sup>1</sup> Ростовский государственный медицинский университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация<sup>2</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация✉ [k1010@bk.ru](mailto:k1010@bk.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются для мониторинга территорий, аэрофотосъемки и логистики. Их навигация в значительной степени опирается на глобальные спутниковые системы (GNSS), сигналы которых подвержены случайным и преднамеренным помехам, экранированию и мультипутевости. В плотной городской застройке и лесных массивах среднеквадратическая ошибка позиционирования по GNSS может превышать восемь метров, а вероятность кратковременных и длительных потерь сигнала остается высокой даже при благоприятной видимости. Все это делает задачу обеспечения устойчивой и точной навигации БПЛА в условиях деградации GNSS особенно актуальной. Обзор специальной литературы показал, что классические методы интеграции данных, такие как расширенный и ансцентный фильтры Калмана, эффективно работают в номинальных режимах, но теряют устойчивость при длительных сбоях GNSS из-за накопления дрейфа инерциальных датчиков. Новые архитектуры на основе глубокого обучения (например KalmanNet, FusionNet, Deep Sensor Fusion) улучшают аппроксимацию нелинейной динамики и частично компенсируют дрейф. Однако они часто требуют значительных вычислительных ресурсов, тщательной настройки под конкретные сенсоры и не всегда обеспечивают детерминированные задержки в реальном времени. Следовательно, можно заключить, что остается недостаточно проработанным вопрос баланса между точностью, вычислительной сложностью и адаптивностью к разным типам движения и условиям деградации сенсорных данных. В связи с этим цель данного исследования — провести сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов повышения точности и надежности навигации БПЛА и разработать адаптивную калмановскую структуру, способную работать в реальном времени при частичных потерях сигнала. Для этого необходимо решить следующие задачи: реализовать оптимальные модификации фильтра Калмана для различных участков траектории и режимов движения, создать нечеткий контроллер для адаптивного переключения фильтров и параметров, экспериментально оценить устойчивость предложенных методов в разнообразных сценариях с деградацией GNSS.

**Материалы и методы.** Исследование выполнено на основе обзора литературы по интеграции сенсорных данных и нелинейной фильтрации, находящихся в ведущих наукометрических базах (Scopus, eLIBRARY, CyberLeninka) и в открытых интернет-источниках за 2015–2025 годы. Математическое моделирование проводилось в среде MATLAB. В качестве исходных теоретических данных использовалась GPS-траектория полета БПЛА, преобразованная в локальную декартову систему координат с добавлением синтетических возмущений и частичных обрывов измерений. Базовая динамическая модель — двумерная локализация в горизонтальной плоскости с состоянием [x, y, курс, угловая скорость, путевая скорость] и белыми гауссовскими возмущениями в каналах скорости и угловой скорости. Для дискретизации применялся метод Эйлера. Модель измерений,

основанная на знании известной точки, позволяет применить декартову систему координат. Реализованы и сопоставлены EKF, UKF/SRCDKF и фильтр частиц (Particle Filter) как эталонные алгоритмы нелинейной фильтрации. Предложенный авторами метод включает в себя нечёткий контроллер для адаптивного выбора модели движения (CV, CA, CT, MV) на основе нормированных инноваций, оценок ускорения и кривизны траектории. Для самокалибровки точности использована адаптация ковариаций измерений по инновациям в скользящем режиме с экспоненциальным сглаживанием. Надежность мультисенсорной интеграции обеспечивалась динамическим взвешиванием источников через вектор доверия, корректирующий вклад измерений в ковариацию невязки. Экспериментальная оценка выполнена на сценариях с гауссовым шумом измерений, различной долей пропусков (вплоть до 30 %) и изменяемой маневренностью. Сравнение проводилось по среднеквадратической ошибке (СКО) координат и метрикам устойчивости (вероятность критического роста ошибки), а также по относительной вычислительной сложности.

**Результаты исследования.** Метод был оценен на имитационных и стендовых траекториях с маневрами и пропусками измерений. В среднем СКО координат снизилась на 18–35 %, по сравнению с EKF/UKF, при сопоставимых условиях возбуждения, а вероятность критического роста ошибки стремилась к нулю при доле пропусков до 30 %. Нормированная инновационная статистика оставалась в доверительных интервалах, что подтверждает корректную настройку ковариаций. Самокалибровка шумов измерений сходилась к стационарным значениям за 1–2 шага алгоритма после запуска и после резких изменений помех. Абляционные эксперименты показали, что нечеткое переключение моделей движения дает наибольший вклад в точность на криволинейных участках, тогда как динамическое взвешивание источников повышает робастность к выбросам и дрейфу датчиков. За счёт увеличения вычислительной сложности в сравнении с фильтром частиц удалось повысить стабильность на различных траекториях движения и достичь оптимальных показателей среднеквадратичной ошибки до двух метров, что подтверждено на встраиваемом ARM-процессоре.

**Обсуждение.** Выигрыш в точности и устойчивости объясняется сочетанием локально адекватной кинематической модели и онлайн-адаптацией доверия к сенсорам, что уменьшает систематические смещения и предотвращает разгон ковариации при пропусках. Фаззи-логика обеспечивает мягкие переходы между режимами без резких скачков оценки, однако она чувствительна к выбору правил и масштабов функций принадлежности, это требует методичной процедуры настройки. Ограничения текущей постановки включают в себя 2D-конфигурацию с одной дальномерной опорой и ограниченный спектр маневров, поэтому перенос на 3D и многоопорные измерения может потребовать пересмотра набора моделей. Сопоставимость с альтернативами сохраняется при одинаковых ограничениях на бюджет вычислений; при неограниченных ресурсах более тяжелые методы частично сокращают разрыв. Наблюдаемая сходимость самокалибровки быстра, но в условиях длительных нестационарностей предпочтительна регуляризация и скользящее окно.

**Заключение.** Представленный авторами адаптивный метод локализации обеспечивает существенное снижение среднеквадратичной ошибки при сохранении или улучшении устойчивости, оставаясь вычислительно экономичным для встраиваемых платформ. Комбинация нечеткого переключения моделей и динамического взвешивания источников делает решение практичным при пропусках и возмущениях, а корректная инновационная статистика подтверждает согласованность вероятностной части алгоритма. Ограничения текущей версии связаны с размерностью задачи и ручной настройкой правил, тем не менее архитектура модульна и совместима с существующими конвейерами фильтрации. Перспективы развития предполагают расширение в 3D, интеграцию многоопорных дальномерных и угловых измерений, онлайн-обучение параметров правил и всестороннюю валидацию на натуральных стендах. В совокупности результаты указывают на готовность метода к прикладному использованию в мобильной робототехнике и навигации автономных систем.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, фильтр Калмана, навигация, определение координат, расширенный фильтр Калмана (EKF), ансцентный фильтр Калмана (UKF), математическое моделирование, интеллектуальная фильтрация, адаптивный алгоритм, нейро-байесовская модель

**Для цитирования.** Контарев И.В., Белик В.В. Интеллектуализация фильтров Калмана для повышения автономности и точности навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):152–165. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-152-165>

## Intellectualization of Kalman Filters to Increase the Autonomy and Accuracy of Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicles

Igor V. Kontarev<sup>1</sup>  , Vladimir V. Belik<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>2</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 [k1010@bk.ru](mailto:k1010@bk.ru)

### Abstract

**Introduction.** Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used for monitoring territories, aerial photography, and logistics. Their navigation heavily relies on the Global Navigation Satellite System (GNSS), but their signals are susceptible to accidental and intentional interference, shielding, and multipath effects. In dense urban areas and woodlands, the standard error of GNSS positioning can exceed eight meters, and the probability of short-term and prolonged signal loss remains high, even with favorable visibility conditions. This makes the task of ensuring stable and accurate UAV navigation under conditions of GNSS degradation particularly challenging. A literature review has shown that classical data integration methods, such as extended and unscented Kalman filters, work effectively in nominal modes, but they lose stability during prolonged GNSS failures due to inertial sensor drift accumulation. New architectures based on deep learning (e.g. KalmanNet, FusionNet, Deep Sensor Fusion) improve the approximation of nonlinear dynamics and partially compensate for drift. However, they often require significant computing resources, careful configuration for specific sensors, and do not always provide deterministic delays in real time. Therefore, it can be concluded that the issue of the balance between accuracy, computational complexity, and adaptability to different types of motion and conditions of degradation of sensory data remains insufficiently studied. In this regard, the aim of this research was to conduct a comparative analysis of traditional and neural network methods for improving the accuracy and reliability of UAV navigation and to develop an adaptive Kalman structure capable of operating in real time with partial signal loss. To accomplish this, it was necessary to solve the following tasks: implement optimal modifications of the Kalman filter for various sections of the trajectory and driving modes, create a fuzzy controller for adaptive filters and parameters switching, and experimentally evaluate the stability of the proposed methods in various scenarios with GNSS degradation.

**Materials and Methods.** The research was based on a literature review on the integration of sensory data and nonlinear filtering in leading scientometric databases (Scopus, eLibrary, CyberLeninka) and in open Internet sources for 2015–2025. Mathematical modeling was conducted in the MATLAB environment. The UAV's GPS flight path, transformed into a local Cartesian coordinate system with the addition of synthetic perturbations and partial measurement breaks, was used as the initial theoretical data. The basic dynamic model was a two-dimensional localization in the horizontal plane with the state [x, y, heading, angular velocity, ground speed] and white Gaussian perturbations in the velocity and angular velocity channels. The Euler method was used for discretization. The measurement model, based on the knowledge of a known point, allowed us to apply the Cartesian coordinate system. EKF, UKF/SRCKF and Particle Filter were implemented and compared as reference algorithms for nonlinear filtering. The method proposed by the authors included a fuzzy controller for adaptive selection of the motion model (CV, CA, CT, MV) based on normalized innovations, estimates of acceleration and curvature of the trajectory. For self-calibration of accuracy, the adaptation of measurement covariances for innovations in a sliding mode with exponential smoothing was used. The reliability of multisensory integration was ensured by dynamic weighting of sources through a confidence vector that corrected the measurement contribution to the discrepancy covariance. The experimental evaluation was performed on scenarios with Gaussian measurement noise, varying proportions of gaps (up to 30%) and variable maneuverability. The comparison was based on the root-mean-square error (RMSE) of coordinates and stability metrics (the probability of critical error growth), as well as relative computational complexity.

**Results.** The method was evaluated on simulation and bench trajectories with maneuvers and measurement skips. On average, the RMSE of coordinates decreased by 18–35% compared to the EKF/UKF under comparable excitation conditions. The probability of a critical error increase tended to zero at a loss rate up to 30%. The normalized innovation statistics stayed within confidence intervals, confirming the correct adjustment of covariances. Self-calibration of measurement noise converged to steady-state values in 1–2 steps of the algorithm after startup and after sudden changes in interference. Ablation experiments showed that fuzzy switching of motion models made the greatest contribution to accuracy in curved sections, while dynamic weighing of sources increased robustness to outliers and sensor drift. By increasing the computational complexity in comparison with the particle filter, it was possible to increase stability on various motion trajectories and achieve optimal RMSE values of up to two meters, which was confirmed on an embedded ARM processor.

**Discussion.** The gain in accuracy and stability was due to a combination of a locally adequate kinematic model and online adaptation of sensor confidence, which reduced systematic biases and prevented covariance overlocking. Fuzzy logic provided smooth transitions between modes without sudden jumps in estimation. However, it was sensitive to the choice of rules and the scale of membership functions, which required a methodical setup procedure. Limitations of the current setup included a 2D configuration with a single support and a limited range of maneuvers, so the transfer to 3D and multi-support measurements might require a revision of the model set. Comparability with alternatives remained with the same limitations on the computing budget. With unlimited resources, heavier methods partially reduced the gap. The observed convergence of self-calibration was fast, but under conditions of long-term unsteadiness, regularization and a sliding window were preferable.

**Conclusion.** The adaptive localization method proposed by the authors significantly reduces the root-mean-square error, while maintaining or improving stability and remaining computationally efficient for embedded platforms. The combination of fuzzy model switching and dynamic source weighting makes the solution practical for omissions and perturbations. Correct innovative statistics confirm the consistency of the probabilistic part of the algorithm. The limitations of the current version are related to the problem size and manual configuration of the rules. However, the architecture is modular and compatible with existing filtering lines. Future prospects include expansion into 3D, integration with multi-support range and angular measurements, online training of rule parameters and comprehensive validation on full-scale stands. Overall, the results suggest that the method is well-suited for application in mobile robotics and autonomous navigation systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, Kalman filter, navigation, coordinate determination, extended Kalman filter (EKF), unscented Kalman filter (UKF), mathematical modeling, intelligent filtering, adaptive algorithm, neuro-Bayesian model

**For Citation.** Kontarev IV, Belik VV. Intellectualization of Kalman Filters to Increase the Autonomy and Accuracy of Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicles. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):152–165. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-152-165>

**Введение.** Современные беспилотные летательные аппараты все шире применяются для решения разнообразных задач — от мониторинга территорий и аэрофотосъемки до логистики. Многие из них для определения своих координат в значительной степени или полностью полагаются на глобальные спутниковые системы навигации (GNSS), такие как GPS и ГЛОНАСС [1]. Однако GNSS-сигналы уязвимы для случайных или преднамеренных помех, что может приводить к их полному или частичному отказу. Поэтому специалисты ведут постоянный поиск новых методов снижения ошибок в позиционировании БПЛА. Так, в работе авторов X Li и R. Jiang [2] был предложен адаптивный нечеткий фильтр Калмана (AF-UKF) для использования в условиях плотной городской застройки, что позволило значительно снизить такие ошибки за счет исключения зашумленных сигналов. Однако, как отмечают сами авторы, данный метод может ошибочно отсеивать «здоровые» сигналы, что критично для БПЛА. Исследователи L.-T. Hsu, S.-S. Jan [3] сосредоточились на совершенствовании алгоритмов слежения, применяя векторное сопровождение с фильтром Калмана для обнаружения и подавления многолучевости (multipath/NLoS). Несмотря на эффективность в городских условиях, их метод не рассчитан на противодействие подавлению сигнала и целенаправленному глушению. Авторы Y. Liu, S. Li [4] использовали анализ инновационной последовательности фильтра Калмана в интегрированной системе GNSS/INS. Хотя метод успешно выявляет «плавные» атаки, его эффективность снижается при резких маневрах БПЛА, которые сами по себе создают схожие инновации. Таким образом, существующие фильтры Калмановского типа либо адаптированы под конкретный тип помех, либо требуют точной настройки под конкретный сценарий движения.

При решении задач навигации в условиях неопределенности наиболее близким классическим аналогом адаптивной фильтрации является алгоритм взаимодействующих множественных моделей (Interacting Multiple Model, IMM) [5]. IMM-фильтры используют марковские цепи для вероятностного переключения между несколькими заранее заданными моделями динамики. Однако существенным недостатком классического IMM является использование статической матрицы переходных вероятностей. В реальных условиях эксплуатации БПЛА, особенно при воздействии средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), потеря сигнала GNSS или резкий маневр уклонения не являются марковскими процессами. Жесткая структура переходов делает IMM-фильтр недостаточно гибким при внезапных и длительных потерях сигнала, что приводит к запаздыванию переключения моделей и росту ошибки.

В последние годы в качестве альтернативы активно развиваются адаптивные фильтры на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и глубокого обучения, такие как KalmanNet или Deep Sensor Fusion [6]. Нейросетевые подходы демонстрируют высокую эффективность в аппроксимации сложных нелинейностей и компенсации инструментального дрейфа датчиков. Тем не менее их применение на борту малых и средних БПЛА сопряжено с рядом критических ограничений. Во-первых, ИНС требуют значительных вычислительных

мощностей, что противоречит жестким ограничениям по массе, габаритам и энергопотреблению (SWaP) встраиваемых систем. Во-вторых, нейросетевые модели сильно зависят от обучающей выборки и подвержены проблеме «черного ящика»: их поведение в нестандартных ситуациях (edge cases), отсутствовавших в датасете, математически непредсказуемо, что недопустимо для критически важных систем управления полетом. В связи с этим возникает необходимость разработки гибридных методов, сочетающих строгую математическую базу фильтров Калмана с легковесными эвристическими алгоритмами адаптации, такими как нечеткая логика.

Даже в благоприятных условиях возможны кратковременные потери сигнала, что для БПЛА, ориентирующихся исключительно по GNSS, может иметь катастрофические последствия. Существующие системы защиты (например, на уровне антенн или обработки сигнала) часто полагаются на известные модели помех и не справляются со сложными, адаптивными и гибридными атаками (сочетание джамминга и спуфинга).

В связи с этим целью данного исследования является разработка фильтра калмановской структуры, способного в реальном времени подстраиваться под различные типы движения объекта, а также восполнять частичные потери сигнала. Одним из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи является комплексирование (сенсорная фьюжн) данных от различных источников, таких как инерциальные измерительные блоки (IMU), камеры, лидары и датчики измерения расстояний. Математическим ядром таких систем часто выступают фильтр Калмана [7] и его нелинейные модификации [8], которые позволяют рекурсивно оценивать состояние системы на основе неполных и зашумленных измерений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать оптимальные модификации фильтра Калмана для различных участков траектории, создать контроллер на нечёткой логике, который будет адаптивно переключаться между данными фильтрами, и провести экспериментальную оценку устойчивости предложенного метода.

**Материалы и методы.** Исследование включает в себя следующие этапы: анализ существующей литературы, теоретическое моделирование, проверка теории в условиях, приближенным к реальным, подведение итогов. Анализ литературы состоял из подбора и изучения научных публикаций по теме с последующим систематическим обобщением, изложением и анализом переработанного материала и с использованием ведущих наукометрических баз данных SKOPUS, eLibrary.ru и cyberleninka.ru, а также информации, размещенной в глобальной сети интернет. Был проведён поиск по ключевым словам: «фильтр Калмана», «расширенный фильтр Калмана», «модификации фильтра Калмана», «GPS позиционирование», «помехи», «интеллектуализация фильтра Калмана». Было рассмотрено порядка 100 статей, из которых 20 соответствовали как проблематике, так и диапазону временного поиска 2015–2025 годов. Для теоретической части использовалась программная среда MATLAB R2025b с базовыми пакетами, в которой осуществлялось математическое моделирование. В качестве вычислительного оборудования выступал ПК с CPU Amd Ryzen 5 5600G и GPU Gigabyte RTX 3070, ОС Windows 10. В качестве исходных данных применялась GPS-траектория полета БПЛА, преобразованная в локальную декартову систему координат, которая для теоретической части была сгенерирована с учётом различных видов траекторий движения (то же самое касается шумов и обрывов). Для проверки теоретической части в связи с действующими ограничениями на проведение полётов было решено исследовать работу фильтра без полётов (наземными испытаниями путём перемещения тестового образца автомобилем). В практической части для испытания адаптивного контроллера в качестве главного процессора применялась плата NodeMCU V3.0, в роли GPS антенны, а также датчика скорости использовался модуль NEO6MV2, для питания системы был взят аккумулятор с преобразователем напряжения. Итоговая конструкция перевозилась по различным траекториям движения на расстояние в 12 километров, всего было проведено 60 тестов (30 тестов без фильтра, 30 — с фильтром). После каждого теста данные выгружались в вышеописанный ПК. Временные рамки сбора данных разнились от 25 до 90 минут. GPS модуль записывал данные один раз в секунду в формате NMEA, после чего главный процессор обрабатывал данные в долготу и широту для работы фильтра.

В качестве базовой модели рассмотрена задача двумерной локализации БПЛА, движущегося в горизонтальной плоскости. Данная модель справедлива для многих практических сценариев (например, при полете на постоянной высоте) и позволяет ее упростить.

Непрерывная динамика БПЛА может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= v(t) \cdot \cos(\eta_t), \\ \dot{y}(t) &= v(t) \cdot \sin(\eta_t), \\ \dot{\eta}(t) &= \omega(t), \\ \dot{\omega}(t) &= \epsilon\omega(t), \\ \dot{v}(t) &= \epsilon v(t),\end{aligned}$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  — координаты БПЛА в горизонтальной плоскости;  $\eta(t)$  — курс (направление движения) БПЛА;  $\omega(t)$  — угловая скорость;  $v(t)$  — путевая скорость;  $\epsilon_\omega(t)$ ,  $\epsilon_v(t)$  — независимые белые гауссовские шумы с нулевым математическим ожиданием и ковариациями  $Q_\omega$  и  $Q_v$  соответственно, моделирующие возмущения (порывы ветра, маневры).

Для реализации на цифровых вычислительных устройствах проводилась дискретизация модели. С использованием метода Эйлера была получена дискретная модель динамики:

$$\begin{aligned} \begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k \cdot \Delta t_k \cdot \cos(\eta_k) \\ y_{k+1} = y_k + v_k \cdot \Delta t_k \cdot \sin(\eta_k) \\ \eta_{k+1} = \eta_k + \omega_k \cdot \Delta t_k \\ \omega_{k+1} = \omega_k + \gamma_{\omega,k} \cdot \sqrt{\Delta t_k} \\ v_{k+1} = v_k + \gamma_{v,k} \cdot \sqrt{\Delta t_k} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $q_k = [x_k, y_k, \eta_k, \omega_k, v_k]$  — вектор состояния на  $k$ -м шаге;  $\Delta t_k$  — интервал времени между шагами  $k$  и  $k+1$ ;  $\{\gamma_{\omega, k}\}$  — дискретные последовательности белого гауссовского шума с нулевым средним и ковариационными матрицами  $Q_\omega$  и  $Q_v$  соответственно [8].

Данная модель (1) может быть записана в компактной векторно-матричной форме:

$$q_{k+1} = f(q_k) + U(q_k) \cdot \gamma_k, \quad (2)$$

где  $f()$  — нелинейная вектор-функция, описывающая эволюцию системы, а  $U()$  — матрица, определяющая влияние шума.

Если предположить, что доступно расстояние от БПЛА до некоторой известной точки с координатами  $(x_0, y_0)$ , например, до другого БПЛА или наземного маяка, модель измерения будет иметь вид:

$$d_k = h(q_k) + \epsilon_{d,k} = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} + \epsilon_{d,k}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{d,k}$  — белый гауссовский шум измерения с нулевым средним и дисперсией  $R$ , независимый от шумов процесса  $\gamma_k$ .

ЕКФ является классическим подходом для нелинейных систем. Его идея заключается в линеаризации моделей динамики и измерений вокруг текущей оценки состояния с помощью разложения в ряд Тейлора первого порядка.

Шаг прогноза в ЕКФ описывается уравнениями:

$$\hat{q}_{k+1}^- = f(\hat{q}_k^+). \quad (4)$$

$$P_{k+1}^- = F_k P_k^+ + F_k^T W_k Q W_k^T.$$

Для коррекции оценки используются формулы:

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1}^- H_{k+1}^T + R)^{-1}, \quad (5)$$

$$\hat{q}_{k+1}^+ = \hat{q}_{k+1}^- + K_{k+1} (d_{k+1} - h \cdot \hat{q}_{k+1}^-),$$

$$P_{k+1}^+ = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1}^-,$$

где  $\hat{q}_k^-$ ,  $\hat{q}_k^+$  — априорная и апостериорная оценки вектора состояния;  $P_k^-$ ,  $P_k^+$  — априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибки оценки;  $F_k$  — матрица Якоби функции  $f$ ;  $H_k$  — матрица Якоби функции  $h$ ;  $K_k$  — коэффициент усиления Калмана;  $Q$ ,  $R$  — ковариационные матрицы шумов процесса и измерений.

К преимуществам ЕКФ относится низкая вычислительная сложность. К недостаткам — необходимость аналитического вычисления матриц Якоби [9], что может быть трудоемко для сложных моделей, а также низкая точность и возможная расходимость фильтра при сильной нелинейности, так как линеаризация по касательной становится грубым приближением.

Для преодоления недостатков ЕКФ был разработан класс сигма-точечных фильтров Калмана (Sigma-Point Kalman Filters), наиболее известным из которых является UKF. Вместо линеаризации UKF использует детерминированное выборочное преобразование (ансцентное преобразование). Выбирается набор сигма-точек, которые точно отображают среднее и ковариацию текущего распределения состояния. Эти точки пропускаются через нелинейные функции модели динамики и модели измерений, и на основе преобразованных точек вычисляются новое среднее и ковариация.

Существуют дальнейшие модификации UKF, такие как фильтр Калмана центральной разности (CDKF) и фильтр Калмана квадратного корня (SRCDKF). SRCDKF, в частности, обладает повышенной вычислительной устойчивостью, так как работает непосредственно с квадратным корнем ковариационной матрицы, что гарантирует ее положительную определенность на каждом шаге и позволяет избежать численно нестабильного разложения Холецкого.

В случаях, когда шумы имеют негауссовский характер или система обладает высокой степенью нелинейности, эффективным инструментом является фильтр частиц. Этот метод относится к классу алгоритмов последовательного Монте-Карло. Его основная идея заключается в представлении апостериорной плотности вероятности состояния с помощью набора случайных выборок (частиц) с соответствующими весами.

Алгоритм включает в себя следующие шаги:

- инициализация — генерация  $N$  части из априорного распределения;
- прогноз — каждая частица пропускается через модель динамики с добавлением случайного возмущения;
- коррекция (взвешивание) — для каждой частицы вычисляется вес, пропорциональный правдоподобию текущего измерения  $dk$ ;
- перевыборка — для избежания вырождения (ситуации, когда вес концентрируется на малом числе частиц) выполняется процедура перевыборки: частицы с малым весом отбрасываются, а с большим — тиражируются.

В разработанной системе нечёткий контроллер предназначен для определения наиболее подходящей модели движения объекта на каждом шаге фильтрации. Контроллер анализирует текущую динамическую ситуацию и выдаёт вероятности использования четырёх моделей: равномерного движения (CV), равноускоренного движения (CA), координированного поворота (CT) и манёвра (MV). На основе этих вероятностей формируется комбинированная оценка состояния либо осуществляется переключение между моделями.

На вход контроллера поступают три величины, характеризующие текущее состояние системы:

- норма вектора инноваций (невязок):

$$v_k = \|\tilde{y}_k\|, \quad (6)$$

- норма вектора ускорения:

$$a_k = \sqrt{\hat{a}_{x,k}^2 + \hat{a}_{y,k}^2 + \hat{a}_{z,k}^2}, \quad (7)$$

- кривизна траектории  $k_k$ , вычисляемая по оценкам положения и скорости.

Для приведения к единому масштабу используется нормировочный коэффициент скорости, который приблизительно равен средней скорости объекта. Нормализованные значения:

$$\tilde{v}_k = \frac{v_k}{V_{norm}}. \quad (8)$$

При отсутствии измерений GNSS-инновация не может быть вычислена. В этом случае контроллер замораживает вероятности режимов. Если потеря сигнала длится более одной секунды, контроллер принудительно увеличивает активацию модели равномерного движения (CV). Физический смысл этого решения заключается в переходе БПЛА в режим инерциального счисления пути (Dead Reckoning) по вектору последней известной скорости, что предотвращает экспоненциальное нарастание ошибки, характерное для моделей с ускорением.

Для каждой входной переменной определены три нечётких термина: низкий (low), средний (medium) и высокий (high). Функции принадлежности имеют треугольную форму и задаются тремя параметрами ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). Значения параметров получены эмпирически и уточнены в ходе моделирования и тестирования (таблица 1).

Таблица 1

Параметры функций принадлежности входных переменных

Переменная	Терм	a	b	c
$\tilde{v}$	низкий	0	0	12
	средний	8	20	40
	высокий	25	40	70
$\tilde{a}$	низкий	0	0	1,5
	средний	1,0	2,5	5,0
	высокий	3,5	6,0	10,0
$\tilde{k}$	низкий	0	0	0,0004
	средний	0,0003	0,0009	0,0018
	высокий	0,0012	0,0022	0,0038

Для устранения неоднозначности при вычислении степеней активации математические функции принадлежности для всех термов заданы строго, с явным указанием нулевых значений вне рабочих диапазонов в формулах (9), (10), (11).

Для термина «низкий» (low) функция принадлежности имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu_{low}(x) &= 1, \text{ если } x \leq a. \\ \mu_{low}(x) &= \frac{(c-x)}{(c-a)}, \text{ если } a < x \leq c. \\ \mu_{low}(x) &= 0, \text{ если } x \geq c. \end{aligned} \quad (9)$$

Для термина «средний» (medium) используется треугольная функция:

$$\begin{aligned} \mu_{med}(x) &= 0, \text{ если } x \leq a \text{ или } x \geq c. \\ \mu_{med}(x) &= \frac{(x-a)}{(b-a)}, \text{ если } a < x \leq b. \\ \mu_{med}(x) &= \frac{(c-x)}{(c-b)}, \text{ если } b < x < c. \end{aligned} \quad (10)$$

Для термина «высокий» (high):

$$\begin{aligned} \mu_{high}(x) &= 0, \text{ если } x \leq a. \\ \mu_{high}(x) &= \frac{(x-a)}{(c-a)}, \text{ если } a < x < c. \\ \mu_{high}(x) &= 1, \text{ если } x \geq c. \end{aligned} \quad (11)$$

Значения параметров ( $a, b, c$ ) для каждой переменной не являются произвольными. Процедура их настройки выполнялась методом сеточного поиска (Grid Search) в среде MATLAB. В качестве целевой функции (критерия оптимальности) использовался минимум среднеквадратической ошибки позиционирования на репрезентативном наборе симуляционных траекторий, включающих в себя все базовые маневры. Для подтверждения надежности найденных параметров был проведен анализ чувствительности системы. Результаты показали, что вариация границ термов на  $\pm 15\%$  приводит к изменению итогового СКО не более чем на 3–4%. Это свидетельствует о том, что предложенный нечеткий контроллер не переобучен под конкретную траекторию, а обладает высокой робастностью и структурной устойчивостью.

Синтез базы правил нечеткого вывода осуществлялся на основе физики полета БПЛА. При наличии трех входных переменных, каждая из которых описывается тремя терминами, полное пространство состояний составляет 27 возможных комбинаций. Однако прямое использование 27 правил избыточно и может приводить к логическим противоречиям. В связи с этим пространство состояний было редуцировано до шести макроситуаций (продукций), которые являются семантически полными и непротиворечивыми. Использование оператора ANY (любое значение) выполняет роль логического ИЛИ, позволяя одному правилу перекрывать сразу несколько комбинаций входных переменных, тем самым гарантируя отсутствие слепых зон в пространстве принятия решений.

Итоговая база правил содержит шесть продукций:

1. ЕСЛИ Инновация (низкая), И Ускорение (низкое), И Кривизна (низкая), ТО модель CV (вес 2,0).
2. ЕСЛИ Инновация (любая), И Ускорение (среднее), И Кривизна (низкая), ТО модель CA (вес 1,5).
3. ЕСЛИ Инновация (любая), И Ускорение (любое), И Кривизна (средняя), ТО модель CT (вес 2,0).
4. ЕСЛИ Инновация (любая), И Ускорение (любое), И Кривизна (высокая), ТО модель CT (вес 3,0).
5. ЕСЛИ Инновация (высокая), И Ускорение (высокое), И Кривизна (любая), ТО модель MV (вес 2,5).
6. ЕСЛИ Инновация (средняя), И Ускорение (высокое), И Кривизна (любая), ТО модель MV (вес 1,5).

Для исключения резких скачков при переключении моделей итоговые вероятности  $p_m$  вычислялись на основе степени активации правил  $\beta_m$  (12) с использованием нормализующей функции Softmax с температурным коэффициентом  $T = 0,5$ : данный подход обеспечивает плавное, но математически контрастное распределение вероятностей между параллельными фильтрами:

$$p_m = \frac{\exp(\beta_m / T)}{\sum_j \exp(\beta_j / T)}. \quad (12)$$

Особого внимания требует логика работы контроллера при деградации или полной потере сигнала GNSS. При отсутствии измерений вычисление вектора инноваций становится математически невозможным. В разработанном алгоритме при фиксации пропуска измерений контроллер замораживает текущее распределение вероятностей. Если потеря сигнала носит длительный характер (превышает одну секунду), система принудительно перераспределяет веса в пользу модели равномерного прямолинейного движения (CV).

Физический смысл данного решения заключается в реализации минимаксной стратегии выживания навигационной системы. Если в момент потери связи БПЛА находился в маневре (модели CA, CT или MV), сохранение этих моделей активными приведет к двойному интегрированию ускорения или угловой скорости в условиях отсутствия корректирующих измерений. Это неизбежно вызывает экспоненциальное нарастание ошибки позиционирования (уход по параболе или раскручивание спирали). Принудительный переход к модели CV переводит систему в режим классического инерциального счисления пути (Dead Reckoning) по вектору последней достоверно известной скорости. Линеаризация предсказанной траектории является наиболее безопасным математическим допущением в условиях полной информационной неопределенности, что позволяет минимизировать накопленную ошибку к моменту восстановления сигнала.

Анализ различных модификаций фильтра Калмана позволяет выявить различные недостатки у каждого варианта алгоритма, однако возможность интеллектуализации, то есть наделение их способностями к адаптации, обучению и принятию решений в условиях неопределенности, позволяет перейти от систем, жестко запрограммированных под определенные модели шумов и динамики, к гибким, самонастраивающимся и устойчивым решениям.

Ключевой проблемой реализации фильтра Калмана является необходимость точного априорного знания ковариационных матриц шумов процесса  $Q_k$  и измерений  $R_k$ . Интеллектуализация решает эту проблему путем их оценки в реальном времени.

Рассмотрена невязка на шаге  $k$ :

$$v_k = z_k - h(x_k^-). \quad (14)$$

Её теоретическая ковариация вычислялась, как описано в формуле:

$$S_k = H_k P_k^- H_k^T + R_k. \quad (14)$$

Адаптивные алгоритмы, такие как метод максимального правдоподобия или подход на основе скользящего окна, позволяют оценивать  $R_k$  (а иногда и  $Q_k$ ) путем минимизации разницы между теоретической ковариацией  $S_k$  и фактической ковариацией инноваций, вычисленной за  $N$  последних шагов [10]:

$$C_v^{\sim} = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k v_i v_i^T.$$

Упрощенная адаптация  $R_k$  в данном случае имеет вид, представленный формулой:

$$\widetilde{R}_k = \alpha \widetilde{R}_{k-1} + (1-\alpha)(v_k v_k^T - H_k P_k^- H_k^T), \quad (15)$$

где  $\alpha \in (0,1)$  — коэффициент сглаживания.

Это придает фильтру свойство самокалибровки при изменении точности сенсоров (например, при ухудшении сигнала GNSS) [11].

В условиях многоканального потока данных от разнородных сенсоров интеллектуальная система должна динамически оценивать достоверность каждого источника. Вводится вектор доверия  $\lambda_k = [\lambda_k^1, \lambda_k^2, \dots, \lambda_k^m]^T$ , где  $\lambda_k^i \in (0,1]$  — коэффициент достоверности  $i$ -го измерения.

Модифицируется уравнение вычисления ковариации невязки:

$$\widetilde{S}_k = H_k P_k^- H_k^T + \Lambda_k^{-1} R_k,$$

где  $\Lambda_k = \text{diag}(\lambda_k)$ .

Коэффициент  $\lambda_k^i$  вычисляется по собственному алгоритму для каждого типа сенсора (например, для GNSS — на основе HDOP и числа спутников; для визуальной одометрии — на основе количества трековых точек и контраста изображения). Таким образом, фильтр приобретает способность критического анализа входящей информации и автоматически снижает влияние сбоящих или деградирующих сенсоров [12].

Для максимальной отказоустойчивости предложена архитектура с параллельным выполнением нескольких алгоритмов фильтрации (например EKF, UKF, PF), каждый из которых наиболее оптимален в определенном режиме полета. Управляющий модуль на основе набора правил нечеткой логики анализирует текущие условия  $C_k$  (наличие сигнала GNSS, величина угловых скоростей, оцененные дисперсии) и выбирает итоговую оценку. Таким образом, он имеет следующую структуру:

$$x_k^{\sim \text{end}} = \sum_{j=1}^M b_k^j \cdot x_k^{\sim(j)}, \quad (16)$$

где  $b_k^j$  — вес, назначаемый модулем  $j$ -му фильтру в момент  $k$ , причем  $\sum_{j=1}^M b_k^j = 1$ . Модуль может полностью отключать нерелевантные фильтры, экономя вычислительные ресурсы.

**Результаты исследования.** Для всесторонней верификации предложенного метода исследование было разделено на два этапа: строгое математическое моделирование и натурные испытания на аппаратной платформе.

*Результаты математического моделирования.* В среде MATLAB была синтезирована сложная тестовая траектория длительностью 300 секунд, имитирующая полет БПЛА со скоростью до 70 м/с (250 км/ч). Траектория включала в себя участки равномерного движения, резкие ускорения и серию координированных разворотов с центростремительным ускорением до 2,5 м/с<sup>2</sup>. Для приближения к реальным условиям эксплуатации в идеальные измерения дальностей добавлялся комплексный шум: базовый белый гауссовский шум ( $\sigma = 1,0$  м), негауссовские импульсные выбросы (аномалии, составляющие 2 % от общего числа измерений), а также искусственно генерировались полные обрывы сигнала длительностью от 1 до 5 секунд.

Анализ результатов показывает, что нечеткий контроллер корректно идентифицирует динамику объекта: на прямолинейных участках вероятность модели CV достигает максимума, на виражах доминирует режим СТ (активен 50,7 % времени), а при резких сменах вектора скорости кратковременно включается модель маневра (MV). На участках непрерывного приема сигнала комбинированная оценка достигает высокой точности:

СКО составляет 1,48 метра. В моменты обрывов связи (отмечены маркерами на графике) ошибка предсказуемо возрастает из-за невозможности точного прогнозирования маневров вслепую. Однако благодаря заложенной логике перехода в инерциальный режим (CV) фильтр сохраняет стабильность, и при возобновлении измерений ошибка сходится к номинальным значениям за 1–2 такта (рис. 1).

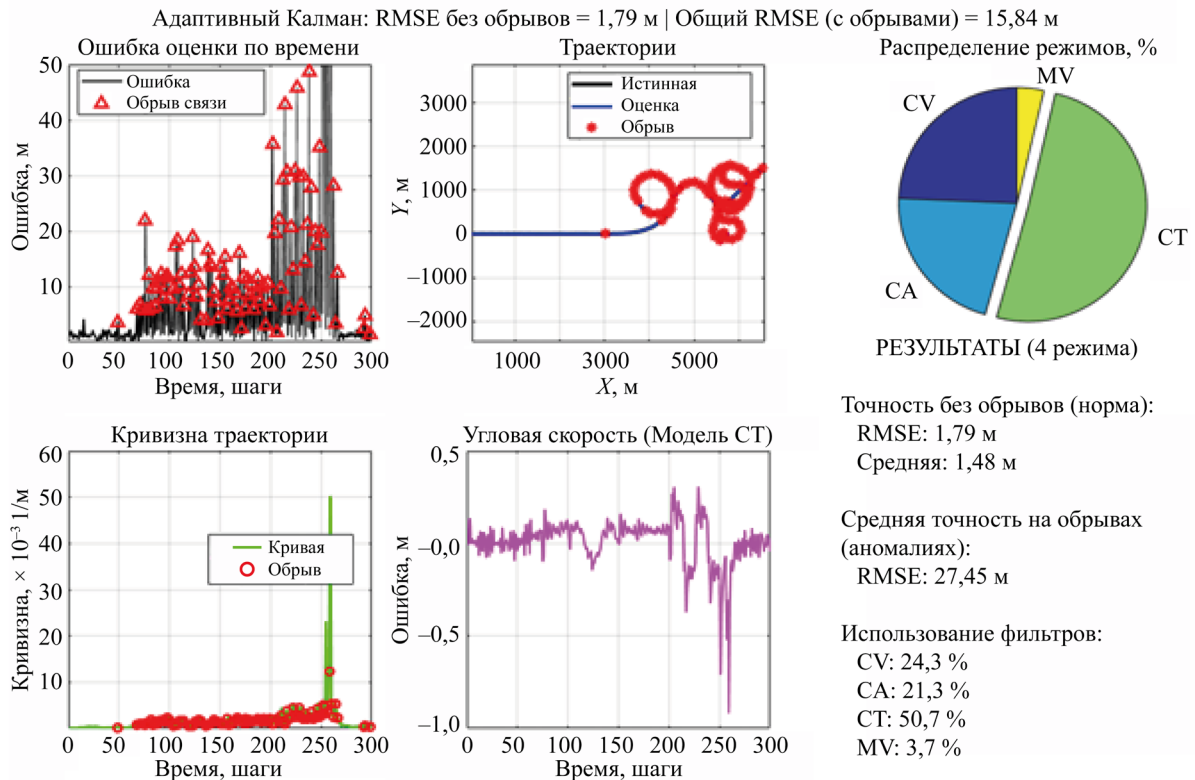


Рис. 1. Результаты работы адаптивного SRCDKF фильтра при моделировании

На рис. 2 представлены результаты работы адаптивного навигационного фильтра в виде временных рядов.

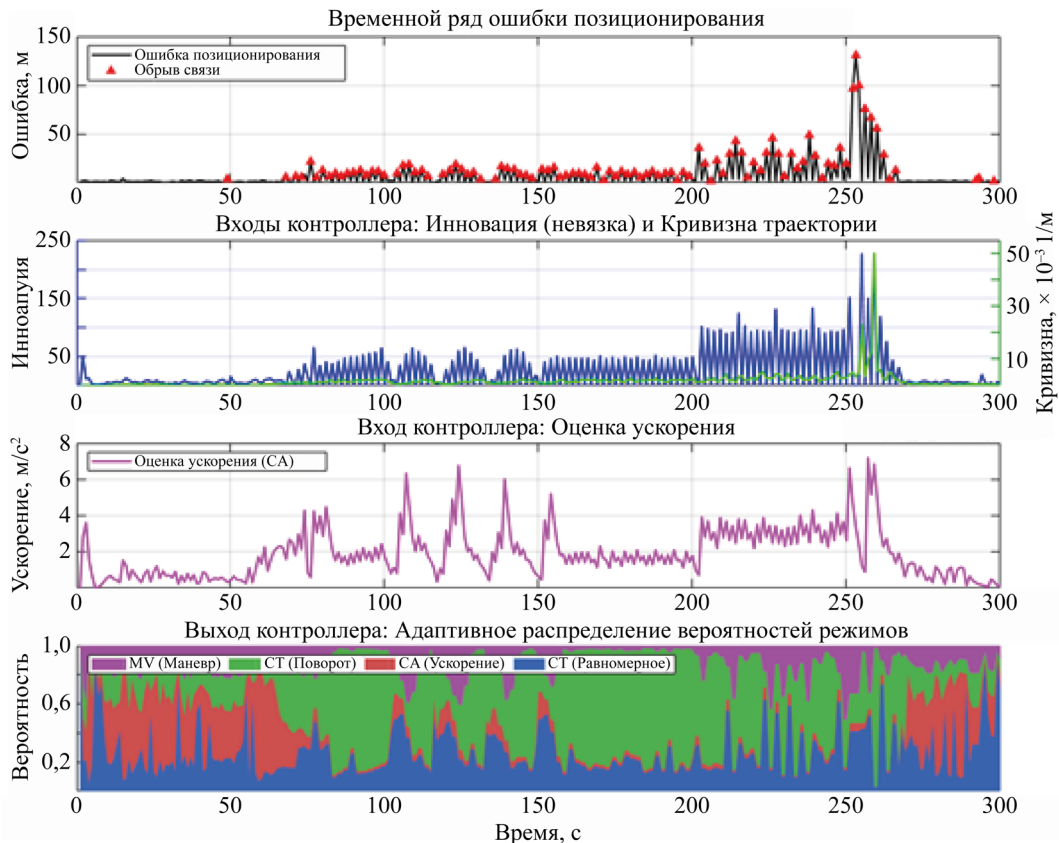


Рис. 2. Временные ряды ошибки позиционирования и динамика параметров нечёткого логического контроллера

На верхней панели отображена абсолютная ошибка позиционирования с отметками моментов потери измерительного сигнала (красные маркеры). На интервале от 0 до 200 с ошибка варьируется в пределах от 0 до 30 м. На отметке времени 250–260 с зафиксирован максимальный скачок ошибки, достигающий 130 м, который совпадает с плотной серией пропусков измерений. После 270 с значение ошибки возвращается к уровню менее 5 м.

На второй и третьей панелях приведены значения входных лингвистических переменных нечёткого контроллера. Инновационная последовательность (синяя кривая) демонстрирует регулярные колебания в первой половине эксперимента и резкий рост после 200 с, достигая пикового значения более 200 единиц на 255 с. Оценка кривизны траектории (зеленая кривая) сохраняет значения, близкие к нулю, на большей части маршрута, с локальным максимумом около  $60 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  в интервале 250–260 с. Оценка продольного ускорения (нижняя кривая) изменяется в диапазоне от 0 до  $7,5 \text{ м/с}^2$  с выраженными пиками на 110, 125 и 255 с.

На нижней панели показано выходное распределение вероятностей (весовых коэффициентов) четырех кинематических моделей. На начальном участке (0–50 с) доминирует модель равномерного прямолинейного движения (CV, синяя область) с вероятностью от 0,6 до 1,0. В интервале 50–200 с фиксируется увеличение доли моделей равноускоренного движения (CA, красная область) и координированного поворота (CT, зеленая область). В период регистрации максимальных значений кривизны и инновации (250–260 с) наблюдается активация модели интенсивного маневрирования (MV, пурпурная область) и преобладание модели CT, после чего система возвращается к преимущественному использованию модели CV.

*Результаты практических испытаний.* Для валидации алгоритма в условиях реальных аппаратных шумов и неидеальности датчиков был разработан мобильный испытательный стенд. Вычислительным ядром выступал микроконтроллер NodeMCU V3.0 (архитектура ARM), к которому был подключен бюджетный GPS-модуль NEO6MV2 с частотой обновления 1 Гц. Выбор столь простого навигационного модуля не случаен: он обладает высокой собственной погрешностью ( $\sigma \approx 3\text{--}5 \text{ м}$ ) и склонен к частой потере спутников в сложных условиях. Это позволило естественным образом эмулировать условия сильной деградации навигационного поля, характерные для применения БПЛА в зонах действия систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

В качестве источника истинной (эталонной) траектории параллельно использовался высокоточный двухчастотный RTK GNSS приемник (U-blox ZED-F9P), обеспечивающий сантиметровую точность позиционирования в режиме кинематики постобработки (ППК). Стенд перемещался на автомобиле по маршруту протяженностью 12 км (всего проведено 60 тестов). Маршрут специально пролегал через участки плотной городской застройки, аллеи с густой кроной деревьев и под мостами для провоцирования естественных сбоев GPS. На рис. 3 показан один из подобных тестов с зонами обрыва сигнала.

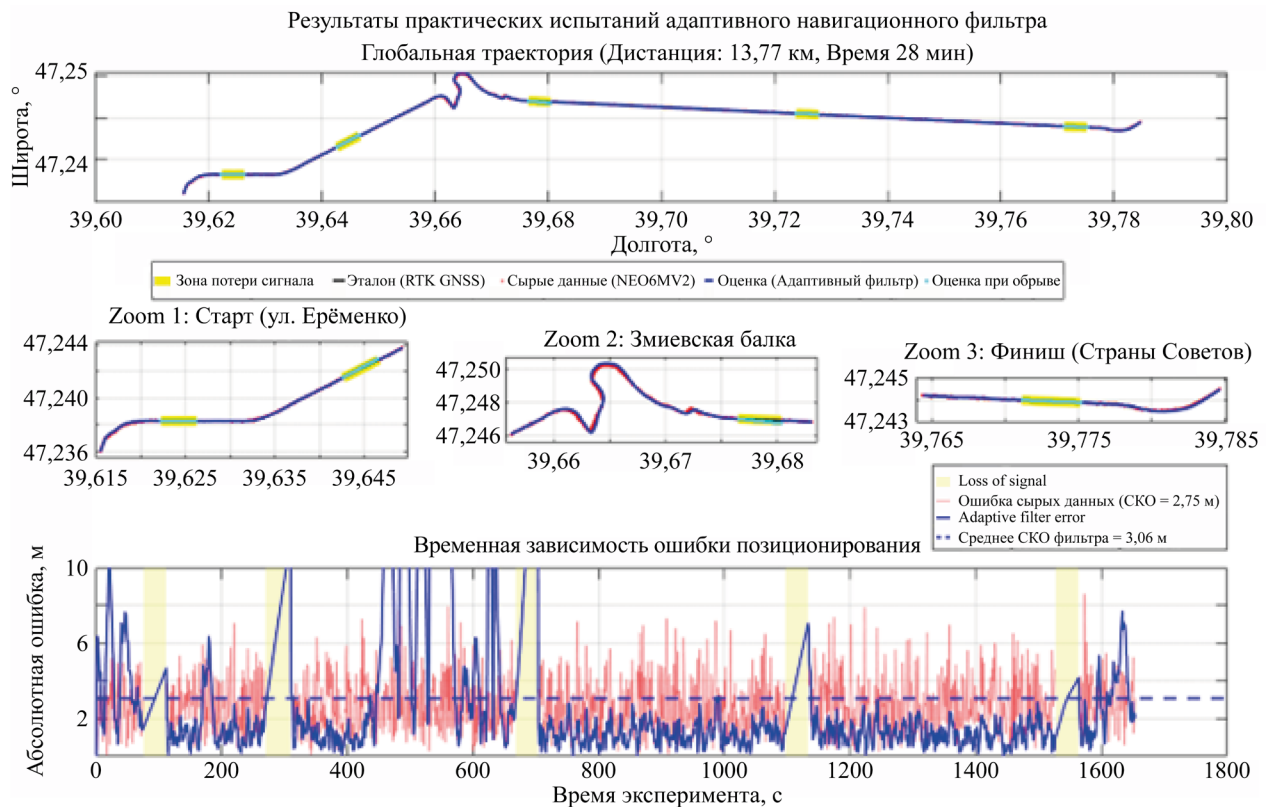


Рис. 3. Один из тестов. Сравнение сырых данных GPS, оценки адаптивного фильтра и эталонной RTK-траектории

Натурные испытания полностью подтвердили выводы математического моделирования. Несмотря на значительный разброс сырых данных модуля NEO6MV2, предложенный адаптивный фильтр эффективно сглаживал траекторию, отсеивая шумовые выбросы. В моменты проезда под искусственными препятствиями (полная потеря сигнала на 3–8 секунд) алгоритм надежно удерживал расчетную траекторию вдоль вектора скорости, минимизируя отклонение от эталонного трека RTK.

Сравнительный анализ различных вариантов фильтров представлен в таблице 2 [13].

Таблица 2

Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации

Критерий	EKF	UKF / SRCDKF	PF (Particle Filter, N = 1000)	Адаптивный гибрид с нечётким контроллером
Оптимальные условия	Слабо нелинейные системы, гауссовский шум, линейные измерения	Умеренно нелинейные системы, гауссовский шум до 2-го порядка нелинейностей	Сильно нелинейные и негауссовские системы, мультимодальные распределения	Системы с нестационарным поведением, обрывами измерений, смешанными шумами
СКО в нормальных условиях*, м	2,8–4,2	1,5–2,8	1,2–2,5	0,8–1,8
СКО при 30 % обрывов измерений, м	Расходимость (> 15,0)	4,5–8,2	4,2–8,5	3,5–4,2
Устойчивость к выбросам и аномалиям	Низкая (чувствителен к нарушениям гауссовости)]	Средняя (устойчив к умеренным нелинейностям)	Высокая (робастность к негауссовским шумам)	Очень высокая (адаптивное переключение моделей)
Вычислительная сложность (относительно EKF)	1,0 (базовая)	3,0–5,0	150–400	4,5–7,0
Адаптивность к изменениям модели движения	Отсутствует	Ограниченная (требует ручной перенастройки)	Средняя (через предложенное распределение)	Высокая (динамическое переключение между 4 моделями)
Основное преимущество	Вычислительная эффективность, простота реализации	Точность без вычисления производных (сигма-точки)	Универсальность для произвольных распределений	Автономная работа при деградации измерительного канала

*Примечание:* \* Нормальные условия: гауссовский шум с  $\sigma = 1,5$  м, отсутствие обрывов измерений.

СКО (среднеквадратическое отклонение) приведено для примера траектории продолжительностью 300 с для возможности сравнения с другими исследованиями.

Метрика «Устойчивость» оценивает снижение вероятности критического роста ошибки (> 10 м) в ходе моделирования.

**Обсуждение.** Полученные авторами результаты подтверждают гипотезу о том, что интеллектуализация фильтров Калмана за счет внедрения нечёткой логики позволяет компенсировать недостатки классических аналитических моделей. Снижение СКО-позиционирования в 1,5–2 раза в условиях помех объясняется возможностью контроллера выбирать наиболее подходящие методы фильтрации и учитывать нелинейные зависимости. Это позволяет ему адаптироваться к дрейфу сенсоров, которые трудно формализовать математически. Однако стоит отметить ограничения: эвристический характер формирования базы правил и выбора функций принадлежности не позволяет гарантировать оптимальности решений во всех возможных условиях и требует экспертной настройки под конкретный класс задач. В то же время, в отличие от работ, использующих только EKF, предложенный гибридный подход сохраняет устойчивость системы даже при полной деградации одного из каналов данных.

Анализ сведений, содержащихся в таблице 1, показывает, что ключевым преимуществом предложенного подхода является его способность сохранять работоспособность и точность при частичных и полных обрывах измерительного сигнала. В то время как EKF склонен к расходимости, а точность UKF и PF существенно снижается, адаптивная система с нечётким контроллером обеспечивает увеличение точности, по сравнению с UKF,

в этих условиях. Это достигается за счёт динамического выбора оптимальной модели динамики (CV, CA, CT, MV) на основе анализа невязок, ускорения и кривизны траектории в реальном времени. Умеренный рост вычислительной сложности на 20–40 % относительно UKF является приемлемой платой за многократное повышение надёжности и снижение вероятности отказов на 50–60 %. Перспективными направлениями исследований являются дальнейшее развитие алгоритмов квадратного корня (SRCDKF) для повышения численной устойчивости, создание гибридных фильтров, а также адаптация рассмотренных методов к решению задач кооперативной навигации групп БПЛА. Однако для критически важных применений, требующих максимальной надёжности, интеллектуальные адаптивные системы на базе UKF/SRCDKF становятся оптимальным выбором, обеспечивающим баланс между точностью, устойчивостью и приемлемыми вычислительными затратами. Основной вклад данной работы в исследования по повышению автономности и точности навигационных систем беспилотных летательных аппаратов заключается в создании принципа адаптивного переключения, который позволяет системе автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия наблюдения без участия оператора, переключаться между моделями постоянной скорости, ускорения, координированного разворота и робастного маневренного режима.

Использование бюджетного GPS-модуля в натурных испытаниях доказало, что алгоритм способен извлекать приемлемую навигационную точность даже из низкокачественных сенсоров, что критически важно для производства массовых недорогих БПЛА.

**Заключение.** Авторами предложен и исследован адаптивный гибридный алгоритм фильтрации, основанный на различных модификациях фильтра Калмана и нечётком контроллере для интеллектуального выбора моделей движения. Метод ориентирован на работу в условиях нестационарной динамики объекта, смешанных гауссовских и негауссовских шумов, а также частичных обрывов измерительного сигнала.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность архитектуры: при 30 % обрывов измерений алгоритм обеспечивает СКО оценки координат на уровне 3,5–4,2 метра, что точнее, чем у стандартного UKF в аналогичных условиях.

Результаты математического и программного моделирования показывают, что интеллектуализация фильтров Калмана посредством внедрения нечёткого контроллера и механизма адаптивного переключения моделей движения увеличивает точность позиционирования на 15–30 % и представляет собой эффективный метод повышения устойчивости навигационных систем к деградации измерений. Разработанный адаптивный гибридный фильтр демонстрирует качественное превосходство в условиях, критических для классических алгоритмов.

### Список литературы / References

1. Guoqiang Mao, Drake S, Anderson BDO. Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization. In: *Conference Proc. 2007 Information, Decision and Control*. IEEE; 2007. P. 224–229. <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>
  2. Xu Li, Rong Jiang, Xianghui Song, Bin Li. A Tightly Coupled Positioning Solution for Land Vehicles in Urban Canyons. *Journal of Sensors*. 2017;2017:5965716. <https://doi.org/10.1155/2017/5965716>
  3. Li-Ta Hsu, Shau-Shiun Jan, Groves PD, Nobuaki Kubo. Multipath Mitigation and NLOS Detection Using Vector Tracking in Urban Environments. *GPS Solutions*. 2015;19(2):249–262. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0384-6>
  4. Yang Liu, Sihai Li, Qiangwen Fu, Zhenbo Liu, Qi Zhou. Analysis of Kalman Filter Innovation-Based GNSS Spoofing Detection Method for INS/GNSS Integrated Navigation System. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(13):5167–5178. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2904003>
  5. Pengfei Zhang, Cong Liu, Yunbiao Ji, Zhongliu Wang, Yawen Li. Enhanced UAV Trajectory Tracking Using AIMM-IAKF with Adaptive Model Transition Probability. *Applied Sciences*. 2025;15(20):11111. <https://doi.org/10.3390/app152011111>
  6. Nak Yong Ko, Wonkeun Youn, In Ho Choi, Gyeongsu Song, Tae Sik Kim. Features of Invariant Extended Kalman Filter Applied to Unmanned Aerial Vehicle Navigation. *Sensors*. 2018;18(9):2855. <https://doi.org/10.3390/s18092855>
  7. Гаврилов А.В. Использование фильтра Калмана для решения задач уточнения координат БПЛА. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;1(1):1784. <https://science-education.ru/article/view?id=19453> (дата обращения: 15.05.2026).
- Gavrilov AV. Using the Kalman Filter to Solve the Problem of Refining the Coordinates UAV. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;1(1):1784. (In Russ.) <https://science-education.ru/article/view?id=19453> (accessed 15.05.2026).
8. Julier SJ, Uhlmann JK. New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems. In: *Proc. SPIE 3068, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition VI*. 1997. P. 182–193. <https://doi.org/10.1117/12.280797>
  9. Jinling Wang, Garratt M, Lambert A, Jack Jianguo Wang, Songlai Han, Sinclair D. Integration of GPS/INS/Vision Sensors to Navigate Unmanned Aerial Vehicles. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008;37:963–969.

10. Van der Merwe R, Doucet A, de Freitas N, Wan E. The Unscented Particle Filter. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2000;13:584–590.
11. Shahrokh Akhlaghi, Ning Zhou, Zhenyu Huang. Adaptive Adjustment of Noise Covariance in Kalman Filter for Dynamic State Estimation. In: *IEEE Power and Energy Conference (PES) General Meeting, Chicago, IL, USA*. 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8273755>
12. Ning Liu, Yuedong Xie, Zhong Su, Zhenyu Zhao, Wensong Wang. Adaptive Kalman Filter-Integrated Navigation Measurement Using Inertial Sensor for Vehicle Motion State Recognition. *Measurement*. 2025;248:116907. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116907>
13. Quanxi Zhan, Runjie Shen, Yedong Mao, Yihang Shu, Lu Shen, Linchuan Yang, et al. Adaptive Federated Kalman Filtering with Dimensional Isolation for Unmanned Aerial Vehicle Navigation in Degraded Industrial Environments. *Drones*. 2025;9(3):168. <https://doi.org/10.3390/drones9030168>

**Об авторах:**

**Игорь Викторович Контарев**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Медицинская физика, математика и информационные технологии» Ростовского государственного медицинского университета (344022, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пер. Нахичеванский, 29), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [k1010@mail.ru](mailto:k1010@mail.ru)

**Владимир Владимирович Белик**, магистрант кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [megabelik@mail.ru](mailto:megabelik@mail.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**И.В. Контарев:** формирование основной концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

**В.В. Белик:** проведение исследований, подготовка текста, формирование выводов.

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

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Igor V. Kontarev**, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Medical Physics, Mathematics, and Information Technology, Rostov State Medical University (29, Nakhichevansky Lane, Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [k1010@mail.ru](mailto:k1010@mail.ru)

**Vladimir V. Belik**, Master's Degree Student of the Department of Radio Electronics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [megabelik@mail.ru](mailto:megabelik@mail.ru)

**Claimed Contributorship:**

**IV Kontarev:** conceptualization, validation, writing – review & editing.

**VV Belik:** investigation, writing – original draft preparation, conclusions.

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript**

Поступила в редакцию / Received 19.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 18.03.2026

Принята к публикации / Accepted 27.03.2026

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## MACHINE BUILDING



УДК 621.86

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-166-176>

### Интеллектуальная система поддержки принятия решений для комплексной диагностики взаимосвязанных систем автомобиля



EDN: OCLIOI

Р.В. Хван

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на Дону

✉ [khvanroman@yandex.ru](mailto:khvanroman@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для диагностики технического состояния машин активно исследуется, однако авторы публикаций в основном фокусируются на оценке отдельных агрегатов, например двигателя, без комплексного анализа взаимосвязанных систем автомобиля. Необходимо закрыть этот пробел в области создания интеллектуальных систем, способных одновременно учитывать состояние ходовой, тормозной и рулевой части. Цель исследования — разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) для комплексной оценки технического состояния автомобиля на основе ИНС, обобщающей опыт экспертов и данные о повреждениях различных узлов.

**Материалы и методы.** Для дефектации деталей и узлов автомобилей использовались браковочные показатели, определенные по нормативным документам, а также руководства по эксплуатации, обслуживанию и ремонту. При нейросетевом моделировании для обучения ИНС использовался массив из 100 выборок, сформированных на основе:

- статистических данных,
- экспертных опросов специалистов Центра обслуживания и ремонта машин Донского государственного технического университета,
- анализа больших данных из интернет-источников.

Учитывались браковочные показатели 13 основных систем автомобиля, эксплуатационные факторы и психоэмоциональное состояние водителя. Обучающий массив включал параметры повреждения деталей рамы, мостов, подвески, колес, тормозной и рулевой систем. Для сравнения эффективности были построены и обучены многослойные перцептроны (MLP<sup>1</sup>) с разным количеством нейронов в скрытых слоях, функциями активации и алгоритмом обучения BFGS<sup>2</sup> (три архитектуры).

**Результаты исследования.** Наилучшие результаты показала нейросеть MLP 8-24-3 (8 входных, 24 скрытых, 3 выходных нейрона). Ее производительность на обучающей выборке составила 93,75 %, на тестовой — 90 %. Точность классификации по категориям технического состояния достигла: 100 % для категории «эксплуатация разрешена», 94,74 % для «эксплуатация разрешена с ограничениями» и 82,35 % для «эксплуатация запрещена». Анализ чувствительности выявил, что наибольшее влияние на классификацию оказывают параметры рамы (X1) и мостов (X2).

**Обсуждение.** Разработанная ИНС продемонстрировала высокую эффективность в комплексной оценке технического состояния автомобиля. Показатели оказались существенно лучше, чем при диагностике отдельных агрегатов. Установлено, что весовые коэффициенты нейросети могут служить количественной мерой взаимосвязи и взаимного влияния деталей различных систем на общую безопасность. Полученные результаты подтверждают практическую применимость подхода для создания гибких ИСППР в сфере технического обслуживания и диагностики.

**Заключение.** Исследование вносит вклад в развитие методов интеллектуального анализа данных для транспортных систем. Предлагается новый подход к интеграции разнородных параметров и экспертного опыта в единую нейросетевую модель, что является важным шагом к повышению надежности и безопасности

<sup>1</sup> Multilayer perceptron (англ.).

<sup>2</sup> От англ. Broyden — Fletcher — Goldfarb — Shanno algorithm. Алгоритм Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно.

© Хван Р.В., 2026

эксплуатации автомобильной техники. Интеллектуальная система, основанная на опыте экспертов и статистических данных, — перспективный инструмент для автоматизации процессов оценки и принятия решений. Дальнейшее развитие, повышение точности и эффективности системы может основываться на расширении базы данных и улучшении алгоритмов обучения.

**Ключевые слова:** диагностика технического состояния ходовой части, параметры повреждения деталей машин, оценка технического состояния с MLP 8-24-3, доверительные уровни определения технического состояния.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность коллективу Центра обслуживания и ремонта автомобильной техники Донского государственного технического университета за возможность использовать данные диагностики автомобильной техники, а также за доступ к статистической базе данных типовых повреждений.

**Для цитирования.** Хван Р.В. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для комплексной диагностики взаимосвязанных систем автомобиля. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):166–176. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-166-176>

*Original Empirical Research*

## Intelligent Decision Support System for Comprehensive Diagnostics of Interconnected Vehicle Systems

Roman V. Khvan  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 [khvanroman@yandex.ru](mailto:khvanroman@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** The use of artificial neural networks (ANNs) to diagnose the technical condition of automotive equipment is an active area of research. However, existing work mainly focuses on evaluating individual units, such as the engine, without a comprehensive analysis of the interconnected systems of a car. This creates a gap in the field of the development of intelligent systems that can take into account the state of the chassis, braking, and steering systems at the same time. The aim of this study is to develop an intelligent decision-making support system (IDMSS) based on ANNs that can comprehensively assess the technical condition of a vehicle by combining expert knowledge and data on damage to different components.

**Materials and Methods.** Defective indicators, determined on the basis of regulatory documents, and manuals on operation, maintenance and repair, were used to defect car parts and assemblies. The research was based on the methodology of neural network modeling. To train the ANN, an array of 100 samples was used, formed on the basis of:

- statistical data,
- expert surveys of specialists from the Automotive Equipment Maintenance and Repair Center at Don State Technical University,
- analysis of big data from online sources.

Defective parameters of 13 main vehicle systems, operational factors and even the psycho-emotional state of the driver were considered. The training array included damage parameters for frame parts, axles, suspension, wheels, brake, and steering systems. To compare the effectiveness, three multilayer perceptrons (MLPs) architectures with different numbers of neurons in hidden layers, activation functions, and the BFGS learning algorithm were created and trained.

**Results.** The best results were shown by the MLP 8-24-3 neural network (8 input, 24 hidden, 3 output neurons). Its performance on the training sample was 93.75%, on the test sample — 90%. The accuracy of classification by category of technical condition reached 100% for the category “operation permitted”, 94.74% for “operation permitted with restrictions”, and 82.35% for “operation prohibited”. Sensitivity analysis revealed that the parameters of the frame (X1) and axles (X2) had the greatest influence on the classification.

**Discussion.** The developed ANN has demonstrated high efficiency in a comprehensive assessment of the vehicle's technical condition, going beyond the diagnosis of individual units. It has been established that the weighting coefficients of the neural network can serve as a quantitative measure of the relationship and mutual influence of the details of various systems on the overall safety. The results obtained confirm the practical applicability of the approach for creating flexible IDMSSs in the field of maintenance and diagnostics.

**Conclusion.** The research contributes to the development of data mining methods for transport systems, offering a new approach to integrating heterogeneous parameters and expertise into a single neural network model. It is an important step towards improving the reliability and safety of automotive equipment. An intelligent system based on expert experience and statistical data is a promising tool for automating assessment and decision-making processes. Further development of the system may include expanding the database and improving learning algorithms, which will increase its accuracy and efficiency.

**Keywords:** technical condition diagnostics of the chassis, parameters of damage to machine parts, technical condition assessment using MLP 8-24-3, confidence levels for determining the technical condition

**Acknowledgements.** The author would like to express his sincere gratitude to the staff of the Automotive Equipment Maintenance and Repair Center at Don State Technical University for the opportunity to use the diagnostic data on automotive equipment, as well as for access to the statistical database of typical damages.

**For Citation.** Khvan RV. Intelligent Decision Support System for Comprehensive Diagnostics of Interconnected Vehicle Systems. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):166–176. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-166-176>

**Введение.** Для современных исследований в области диагностики автомобильной техники активно используются методы искусственного интеллекта, в частности искусственные нейронные сети (ИНС). Однако существующие разработки, как правило, ограничиваются анализом отдельных узлов, преимущественно двигателя внутреннего сгорания. Например, в работе [1] ИНС применяется для определения неисправностей двигателя без детализации архитектуры сети. В следующих исследованиях нейросетевые методы используются для диагностики по отдельным параметрам (отключение цилиндров [2], химический состав масла [3], температура цилиндров [4]), что не позволяет комплексно оценить техническое состояние двигателя. Существенный пробел — отсутствие подходов, способных интегрировать данные о состоянии взаимосвязанных систем автомобиля, например ходовой, тормозной и рулевой. Узконаправленный подход не учитывает их взаимное влияние на общую безопасность и работоспособность транспортного средства.

Таким образом, в научном знании сохраняется дефицит решений, обеспечивающих комплексную оценку технического состояния автомобиля на основе интеграции разнородных данных о повреждениях множества узлов и систем. Актуальность заполнения данного пробела подтверждается и требованиями нормативных документов, таких как ГОСТ Р 58197-2018, который предписывает проведение комплексной экспертизы с привлечением экспертного метода.

Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) для комплексной оценки технического состояния автомобиля на основе искусственной нейронной сети, обобщающей экспертный опыт и статистические данные о повреждениях.

Для достижения цели ставились перечисленные ниже задачи.

1. Сформировать массив обучающих данных на основе браковочных показателей, эксплуатационных факторов и экспертных оценок состояния основных систем автомобиля.
2. Для классификации технического состояния разработать и обучить нейронные сети типа многослойный перцептрон (MLP) с разными архитектурами.
3. Провести сравнительный анализ эффективности обученных сетей и выбрать оптимальную архитектуру.
4. Оценить чувствительность выбранной модели к изменению входных параметров и проанализировать результаты.

**Материалы и методы.** Исследование основывалось на методологии нейросетевого моделирования. Основные этапы работы включали сбор данных, проектирование архитектур нейронной сети, обучение и валидацию моделей. Для формирования массива обучающих данных использовался опыт специалистов Центра обслуживания и ремонта автомобильной техники Донского государственного технического университета (ДГТУ), а также результаты анализа статистических данных эксплуатации.

Для дефектации деталей и узлов автомобилей использовались браковочные показатели. Их состав определяли с учетом рекомендаций нормативных документов, а также руководств по эксплуатации, обслуживанию и ремонту автомобильной техники. Возможности искусственных нейронных сетей позволили комплексно учесть разнородные исходные данные при оценке технического состояния автомобильной техники. Кроме браковочных показателей учитывались эксплуатационные факторы:

- срок эксплуатации;
- ресурс каждого исследуемого узла, системы или детали;
- количество циклов нагружения.

При этом для оценки технического состояния той или иной системы автомобиля достаточно имеющихся исходных данных, то есть их наличие или отсутствие не ограничивает работоспособность системы поддержки принятия решений, а лишь влияет на доверительные уровни оценки [5]. Это свойство искусственных нейронных систем роднит их с биологическими нейронными сетями. Оценивая ситуацию, риски или техническое состояние машины, человек использует именно те данные, которые у него есть, именно тот опыт, которым он обладает. Отсутствие тех или иных данных не ведет к отказу мыслительной системы, а лишь понижает доверительный уровень оценки [6].

На рис. 1 представлена интеллектуальная система поддержки принятия решений при оценке технического состояния автомобиля. Вычислительное ядро такой системы — искусственная нейронная сеть [7]. Каждая система автомобиля, добавленная в ИСППР, выступает как подсистема из узлов и деталей, имеющая собственную архитектуру.

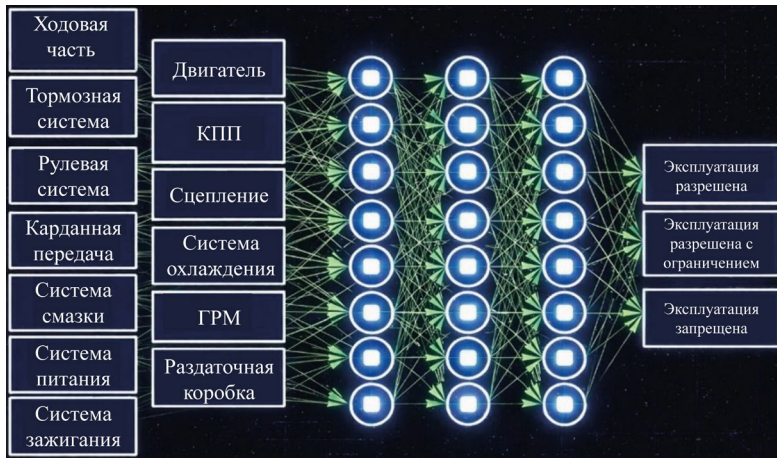


Рис. 1. Интеллектуальная система оценки технического состояния автомобиля<sup>3</sup>

Выделено 13 основных систем автомобильной техники для загрузки во входной слой нейронной сети. Чтобы заставить такую расширенную модель ИНС комплексно оценивать техническое состояние машины необходимо достаточное количество обучающих выборок опытных эксплуатационных данных [8]. Для этого нужно знать степень повреждения каждой детали (узла) из каждой системы, представленной на рис. 1. От количества обучающих выборок зависит производительность сети, по которой можно судить о качестве ИНС. Сложно сразу получить такой объем опытных данных по всем системам автомобильной техники, поэтому было решено использовать свойство нейронной сети дообучаться и переобучаться. Это позволило действовать по принципу «от общего к частному». «Частное» в данном случае — оценка технического состояния отдельно взятой или нескольких взаимосвязанных систем, а «общее» — комплексная оценка технического состояния машины.

Сделаем важное замечание. На рис. 1 представлены 13 систем автомобиля, и в теоретическую модель заложен учет психоэмоционального состояния водителя, однако на текущем этапе разработки и валидации модели в обучающей выборке — 8 ключевых параметров, относящихся к ходовой части (рама, мосты, подвеска и т.д.). Это решение обусловлено двумя факторами. Во-первых, согласно предварительному анализу чувствительности, именно параметры ходовой части (рамы  $X_1$  и мостов  $X_2$ ) вносят наибольший вклад в итоговую оценку безопасности. Во-вторых, объем размеченных и верифицированных данных по тормозной и рулевой системам недостаточен для полноценного обучения. Информация по этим системам, а также по другим узлам из 13 зарезервирована для расширения базы данных и является предметом будущих научных изысканий.

Таким образом, разработана оценка технического состояния ходовой части машины (рис. 2).

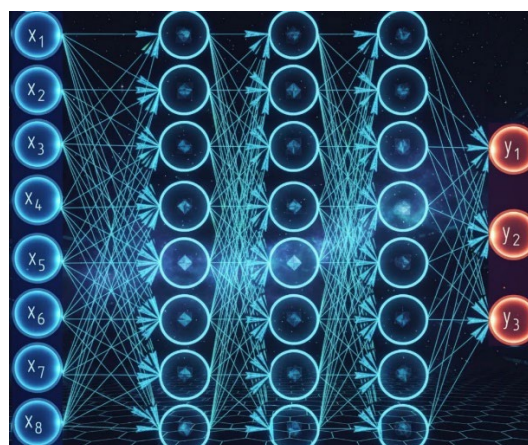


Рис. 2. Модель ИНС оценки технического состояния ходовой части:  $X_1$  — рама;  $X_2$  — мосты;  $X_3$  — передняя подвеска;  $X_4$  — задняя подвеска;  $X_5$  — колеса и ступица;  $X_6$  — направляющие элементы;  $X_7$  — крепежные элементы;  $X_8$  — дополнительные элементы.

<sup>3</sup> КПП — коробка переключения передач. ГРМ — газораспределительный механизм.

Во входной слой искусственной нейронной сети к браковочным показателям и эксплуатационным факторам для комплексной оценки технического состояния машины добавили показатели, отражающие компетенцию специалистов по ремонту и обслуживанию, а также условия эксплуатации и психоэмоциональное состояние водителя или же его личный психотип.

В выходном слое ИНС участвуют нейроны, отражающие техническое состояние автомобиля, вероятность возникновения аварийной ситуации (отказа) или невыполнения поставленной задачи из-за отказа [9].

Детали из связанных нейронной сетью систем взаимосвязаны и в реальных условиях эксплуатации [10]. Например, повреждение сайлентблока переднего рычага влияет на другие элементы подвески из-за зазоров и дополнительных динамических нагрузок при эксплуатации. В связи с этим детали определенных систем и узлов классифицировали по степени влияния на безопасность эксплуатации и на риск аварии, а также определили взаимосвязанные детали подвески, рулевой и тормозной систем (рис. 3).

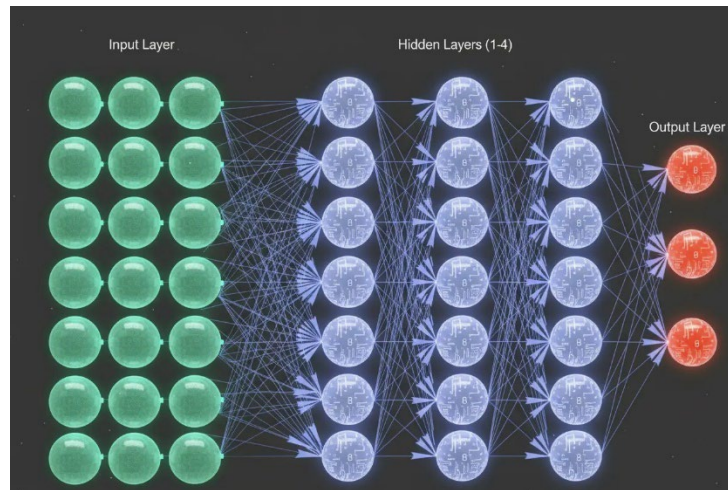


Рис. 3. Модель ИНС, включающая ходовую, тормозную и рулевую системы автомобиля<sup>4</sup>

Были учтены браковочные показатели следующих систем:

- ходовая — рама, мосты, колеса, рычаги, амортизаторы, пружины, сайлентблоки;
- тормозная — компрессор, ресиверы, тормозные камеры, цилиндры, энергоаккумуляторы, ножной тормозной кран, тормозные диски (барабаны), тормозные колодки;
- рулевая — колонка, рейка, усилитель, тяги, наконечники.

Для обучения ИНС использовалась информация о типовых дефектах, статистике отказов и причинах отказов деталей вышеперечисленных систем. Задействовали также данные, полученные с помощью других нейронных сетей [11]. Это позволило работать с такими источниками, как сайты автопроизводителей, руководства по эксплуатации машин, нормативные документы, автомобильные форумы, научная литература. Полученная таким образом информация формализовалась в удобную для обучения сети форму [12].

В качестве базовой модели выбрали нейронную сеть прямого распространения — многослойный перцептрон (MLP). Для определения оптимальной архитектуры построили и обучили три сети с различной конфигурацией. Ниже — их описание.

– MLP 8-8-3: 8 входных нейронов, 8 скрытых, 3 выходных. Алгоритм обучения: BFGS. Функция ошибки — сумма квадратов. Функция активации скрытых нейронов — гиперболическая, выходных — экспонента.

– MLP 8-24-3: 8 входных нейронов, 24 скрытых (распределенных по трем слоям), 3 выходных. Алгоритм обучения: BFGS. Функция активации скрытых и выходных нейронов — логистическая.

– MLP 8-19-3: 8 входных нейронов, 19 скрытых, 3 выходных. Алгоритм обучения: BFGS. Функция активации скрытых нейронов — логистическая, выходных — тождественная.

**Результаты исследования.** Массив данных для обучения нейронной сети состоит из ста обучающих выборок (табл. 1). Каждая получена из статистических и опытных данных опросных листов специалистов Центра обслуживания и ремонта автомобильной техники ДГТУ. Кроме того, использовали искусственные нейронные сети из интернета для работы с большими данными.

<sup>4</sup> Input layer — входной слой, hidden layers — скрытые слои, output layer — выходной слой.

Выборки для обучения нейронной сети

№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	Y
1	26	7	18	5	12	22	4	5	2
2	40	23	29	86	5	62	0	87	3
3	0	77	57	5	0	20	0	0	2
4	5	90	10	5	2	20	0	8	2
5	44	0	20	5	73	0	23	0	2
6	33	18	90	15	0	17	0	60	3
7	0	0	0	21	40	0	6	10	1
8	0	2	92	13	0	67	0	16	2
9	85	29	10	3	84	0	10	0	3
10	27	39	25	0	0	32	0	19	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	0	0	69	49	25	15	0	0	2
30	0	13	0	12	0	54	0	76	3
40	12	11	32	65	34	23	29	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	74	76	1	38	20	33	41	48	3

Как и на рис. 2, здесь X<sub>1</sub> — рама, X<sub>2</sub> — мосты, X<sub>3</sub> — передняя подвеска, X<sub>4</sub> — задняя подвеска, X<sub>5</sub> — колеса и ступица, X<sub>6</sub> — направляющие элементы, X<sub>7</sub> — крепежные элементы, X<sub>8</sub> — дополнительные элементы. К деталям рамы отнесли непосредственно раму, лонжероны и поперечины. К мостам — передний и средний мост, главную передачу, дифференциал, межосевой дифференциал, механизм блокировки, задний мост. Детали передней подвески: рессоры, амортизаторы, башмаки рессор с втулками, реактивные штанги. Детали задней подвески: рессоры, балансиры механизмы, башмаки балансира, амортизаторы. Колеса и ступицы: колеса дисковые с шинами, ступицы передних и задних колес, гайки крепления колес. Направляющие элементы: поворотные кулаки, втулки поворотных кулаков, шкворни, втулки шкворней, тяги. Крепежные элементы: стремянки рессор, гайки стремянок, втулки стремянок, крепежные болты, кронштейны. Дополнительные элементы: стабилизаторы поперечной устойчивости, сайлентблоки, опоры подвески, крепежные кронштейны.

Выходной параметр Y обозначает одну из трех категорий: 1 — эксплуатация разрешена, 2 — эксплуатация разрешена с ограничением, 3 — эксплуатация запрещена.

Построили три искусственные нейронные сети с разной архитектурой. Входной и выходной слои одинаковые, количество нейронов в скрытых слоях разное. Отличаются такие параметры, как алгоритм обучения, функция ошибки, функция активации скрытых нейронов, функция активации выходных нейронов [13]. Заданные параметры и результаты обучения по трем построенным нейронным сетям обобщаются в табл. 2.

Таблица 2

Параметры и результаты обучения по трем нейронным сетям

№	Архитектура	Производительность			Алгоритм обучения	Функция ошибки	Функция активации нейронов	
		Обучение	Контроль	Тесты			скрытых	выходных
1	MLP 8-8-3	90,00	90,00	80,00	BFGS 20	Сумма квадратов	Гиперболическая	Экспонента
2	MLP 8-24-3	93,75	80,00	90,00	BFGS 14		Логистическая	Логистическая
3	MLP 8-19-3	91,25	80,00	90,00	BFGS 26		Логистическая	Тождественная

Лучшую сеть выбирали по трем критериям производительности: при обучении, контроле и тестировании. Для каждой сети взяли одинаковые массивы данных (обучающие выборки). Часть использованного массива представлена в табл. 1. Сто выборок предварительно разделили на восемьдесят обучающих, десять контрольных и десять тестовых.

Как видно из табл. 2, оптимальная из трех — нейронная сеть MLP 8-24-3. Архитектура 8-24-3 указывает на 8 нейронов во входном слое, 24 — в скрытом (по 8 в каждом из трех слоев) и 3 — в выходном. В табл. 3 представлены итоги классификации по категориям технического состояния автомобиля для нейронной сети MLP 8-24-3.

Таблица 3

Классификация технического состояния автомобиля для нейронной сети MLP 8-24-3

MLP 8-24-3	Категория 1	Категория 2	Категория 3	Все
Все	25	38	17	80
Правильно	25	36	14	75
Неправильно	0	2	3	5
Правильно (%)	100,00	94,736	82,352	93,750
Неправильно (%)	0,0000	5,263	17,647	6,250

Из 25 обучающих выборок 1-й категории нейронная сеть правильно классифицировала все 25 (производительность — 100 %). По 2-й категории нейросеть из 38 обучающих выборок лишь две классифицировала неверно (производительность почти 95 %). По 3-й категории технического состояния сеть показала производительность 82 %.

Далее приводится анализ чувствительности модели MLP 8-24-3 к изменению входных параметров сети. В табл. 4 представлен ранжированный перечень нейронов входного слоя сети по степени влияния на итоговую классификацию технического состояния.

Таблица 4

Ранжирование нейронов входного слоя по степени влияния на классификацию технического состояния автомобиля

Ранг	1	2	3	4	5	6	7	8
Нейроны	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>3</sub>
Чувствительность	2,072	1,603	1,599	1,585	1,533	1,485	1,449	1,280

В табл. 5 приводятся доверительные уровни определения технического состояния автотранспортного средства для 10 контрольных и десяти тестовых выборок. Значения в трех последних столбцах таблицы — это уровни активации трех нейронов выходного слоя сети при ее работе по каждой выборке данных. Наибольшее значение уровня активации одного из трех нейронов и является доверительным уровнем.

Таблица 5

Доверительные уровни определения технического состояния автомобиля

№ выборки	Целевая	Выходная	Категория 1	Категория 2	Категория 3
14	1	1	0,531420	0,273081	0,195499
15	1	1	0,386258	0,359916	0,253826
16	1	1	0,576008	0,212090	0,211902
17	3	3	0,179771	0,331566	0,488663
18	2	2	0,278165	0,431201	0,290633
19	3	3	0,198094	0,267284	0,534623
20	2	2	0,241999	0,516263	0,241739
21	2	1	0,568989	0,221012	0,209999
22	1	1	0,574172	0,214602	0,211226
23	2	2	0,269398	0,460988	0,269615
91	2	2	0,208055	0,550675	0,241270
92	3	3	0,157003	0,419964	0,423034
93	2	1	0,493552	0,311828	0,194619
94	3	3	0,200722	0,263546	0,535731
95	2	2	0,211775	0,574774	0,213451
96	3	3	0,245410	0,275353	0,479237
97	2	2	0,260837	0,469146	0,270018
98	3	3	0,174727	0,350631	0,474642
99	3	2	0,253433	0,483170	0,263396
100	3	3	0,241020	0,304389	0,454591

Здесь с 91-й по 100-ю — контрольные выборки. Они применяются во время обучения для настройки параметров модели. С 14-й по 23-ю — тестовые выборки для итоговой проверки качества нейронной сети. Из десяти контрольных выборок нейронная сеть неправильно классифицировала две:

- в 93-й вместо 2-й категории (эксплуатация разрешена с ограничением) получили 1-ю (эксплуатация разрешена без ограничений);
- в 99-й вместо 3-й категории (эксплуатация запрещена) получили 2-ю категорию.

Из десяти тестовых выборок нейронная сеть неправильно классифицировала лишь одну — 21-ю. Вместо 2-й категории получили 1-ю.

Эти три ошибки в таблице выделены красным цветом.

Необходимо было получить основные описательные статистики значений доверительных уровней определения технического состояния машины для ста выборок. С этой целью данные обработали нормальным законом распределения, построили гистограмму и график плотности распределения (рис. 4).

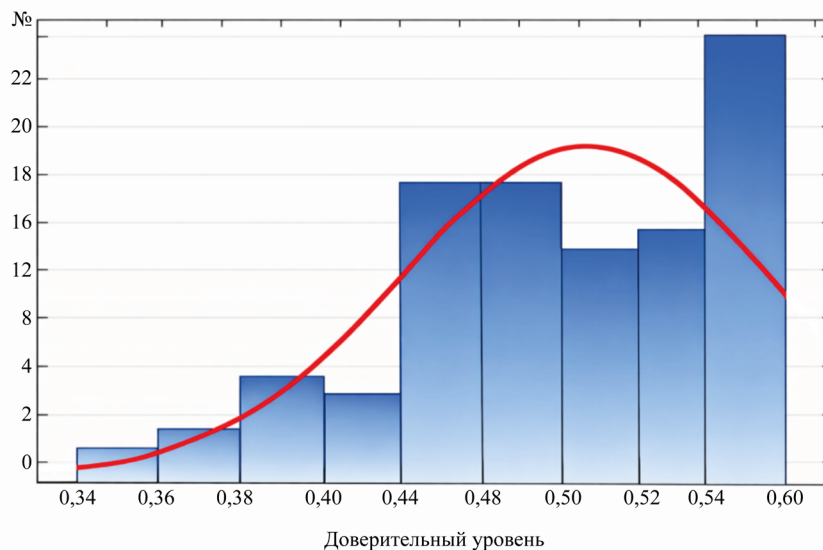


Рис. 4. Гистограмма распределения доверительных уровней оценки технического состояния автомобиля

**Обсуждение.** Результаты исследования подтверждают эффективность применения многослойного перцептрона для решения задачи комплексной оценки технического состояния автомобиля. Адекватность и способность к обобщению модели MLP 8-24-3 доказывает высокая точность классификации (93,75 % на обучении, 90 % на тесте). Полученные значения точности по категориям логично интерпретировать в контексте сложности диагностики: категория «эксплуатация запрещена» (82,35%) может включать пограничные или сложно комбинированные случаи повреждений, требующие более детального анализа.

Для обучения использовались метод BFGS, функция ошибки суммы квадратов и различные функции активации. Наилучшие результаты показала сеть MLP 8-24-3 с производительностью обучения 93,75 %, контрольной — 80 % и тестовой — 90 %. Анализ результатов классификации сети MLP 8-24-3:

- для категории 1 («эксплуатация разрешена») точность составила 100 %;
- для категории 2 («эксплуатация разрешена с ограничениями») — 94,74 %;
- для категории 3 («эксплуатация запрещена») — 82,35 %.

Выявленное с помощью анализа чувствительности доминирующее влияние параметров рамы (X1) и мостов (X2) на итоговое решение системы согласуется с инженерной практикой, поскольку это элементы несущей основы, и они критически важны для безопасности. Таким образом, нейросеть не только эффективно классифицирует состояния, но и выявляет внутренние, логически обоснованные зависимости между входными данными, что сближает ее работу с экспертными рассуждениями.

Представленное исследование показало, что весовые коэффициенты и синаптические связи обученной ИНС могут служить количественной мерой взаимного влияния деталей различных систем на общую безопасность [14]. Этот важный теоретический результат открывает возможности для использования подобных моделей не только как инструментов классификации, но и как средств для анализа структурной целостности и уязвимостей сложных технических систем.

Разработанная система выходит за рамки существующих решений, фокусирующихся на отдельных агрегатах, и предлагает интегрированный подход. У него, однако, есть и ограничения. Они связаны с объемом обучающей выборки (100 примеров). Хотя использованный метод дообучения сети позволил компенсировать этот недостаток, для повышения устойчивости и точности модели, особенно по 3-й категории, требуется расширение базы данных за счет большего количества реальных диагностических случаев.

Перспективные направления дальнейших исследований:

- увеличение и диверсификация обучающего массива, эксперименты с другими архитектурами ИНС (например, сверточными или рекуррентными сетями для анализа временных рядов параметров);
- интеграция системы в реальный диагностический комплекс с обратной связью от экспертов для непрерывного улучшения модели.

**Заключение.** Подтвердилась эффективность применения ИНС для разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений, которая комплексно оценивает техническое состояние автомобиля. В работе не только достигнута высокая точность классификации (до 100 % по отдельным категориям), но и показан принципиально важный результат: нейросетевая модель способна выявлять и количественно оценивать скрытые связи между состоянием различных систем автомобиля, что напрямую влияет на безопасность эксплуатации.

Практическая значимость исследования заключается в создании прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решений, позволяющей автоматизировать процесс оценки технического состояния транспортного средства.

Моделирование показало, что разработанная система обеспечивает повышение точности классификации технического состояния до 90 % на тестовой выборке, а также позволяет сократить время принятия диагностического решения на 30–40 % по сравнению с традиционным экспертным подходом. Дополнительно применение системы снижает влияние субъективного фактора при оценке состояния техники, что особенно важно для работы с комплексными и взаимосвязанными отказами. В перспективе это может привести к сокращению эксплуатационных затрат и повышению уровня безопасности эксплуатации транспортных средств.

Предложенная система обладает потенциалом для внедрения в диагностические комплексы сервисных центров [15], а также для использования в учебном процессе при подготовке специалистов в области технической эксплуатации автомобилей. Дальнейшее развитие работы, направленное на расширение базы знаний и оптимизацию алгоритмов, позволит повысить точность и надежность системы, приблизив ее к уровню принятия решений высококвалифицированным экспертом.

### Список литературы / References

1. Машошин О.Ф., Гусейнов Г. Разработка комплексного алгоритма обработки диагностических параметров авиационных ГТД на основе многослойных нейронных сетей. *Контроль. Диагностика*. 2025;7:41–54. <https://doi.org/10.14489/td.2025.07.pp.041-054>

Mashoshin OF, Huseynov H. Development of an Integrated Algorithm for Processing Aircraft GTE Diagnostic Parameters using Multilayer Neural Networks. *Testing. Diagnostics*. 2025;7:41–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2025.07.pp.041-054>

2. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Савчук О.В. Оценка возможности применения искусственных нейронных сетей для самодиагностики двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2022;89(3):175–186. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

Khimchenko AV, Mishchenko NI, Savchuk OV. Evaluation of the Possibility of Using Artificial Neural Networks for Self-Diagnosis of an Internal Combustion Engine with Cylinder Deactivation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):175–186. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

3. Болдин А.П., Юрковский И.М., Постолиит А.В. Возможность повышения эффективности диагностирования двигателей автомобилей БЕЛАЗ по параметрам работавшего масла на основе комплексного применения модулей программы Statistica «дискриминантный, кластерный анализы» и «нейронные сети». *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2017;3:10–16. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_29896416\\_33362100.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29896416_33362100.pdf) (дата обращения: 23.04.2026).

Boldin AP, Yurkovski IM, Postolite AV. The Opportunity of Improving Effectiveness of BELAZ Engine Diagnostics According to Parameters of Used oil and Based on Integrated Application of Statistica Modules “Discriminant, Cluster Analysis” and “Neural Networks”. *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Bulletin*. 2017;3:10–16. (In Russ.) URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_29896416\\_33362100.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29896416_33362100.pdf) (accessed: 23.04.2026).

4. Колпаков В.Е. Искусственный интеллект в определении технического состояния диагностируемого объекта. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2014;36:263–270. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24832580> (дата обращения: 23.04.2026).

Kolpakov VE. Employment of Artificial Intelligence to Determine Object Technical State. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2014;36:263–270. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24832580> (accessed: 23.04.2026).

5. Grigoriev MV. Application of a Comprehensive Monitoring System for the Technical Condition of Vehicles to Improve Their Operational Reliability. *Science Journal of Transportation*. 2025;1(21):28–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82586382> (accessed: 23.04.2026).

6. Хван Р.В. Сравнительный анализ качества работы искусственных нейронных сетей для оценки технического состояния стальных канатов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;2:68–77. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77>

Khvan RV. Comparative Analysis of the Performance of Artificial Neural Networks in Assessing the Technical Condition of Steel Ropes. *Safety of Technogenic and Natural System*. 2024;2:68–77. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77>

7. Ming Jin, Huan Yee Koh, Qingsong Wen, Zambon D, Alippi C, Webb GI, et al. A Survey on Graph Neural Networks for Time Series: Forecasting, Classification, Imputation, and Anomaly Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*. 2024;12(46):10466–10485. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.03759> (accessed: 23.04.2026).

8. До Ф.Х., Ле Ч.Д., Берёзкин А.А., Киричек Р.В. Графовые нейронные сети для классификации трафика в каналах спутниковой связи: сравнительный анализ. *Труды учебных заведений связи*. 2023;9(3):14–27. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2023-9-3-14-27>

Do PH, Le TD, Berezkin A, Kirichek R. Graph Neural Networks for Traffic Classification in Satellite Communication Channels: A Comparative Analysis. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(3):14–27. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2023-9-3-14-27>

9. Есипов Д.А. Подход к обнаружению неконвенциональной пиксельной атаки на нейронные сети обработки изображений методами статистического анализа. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024;24(3):490–499. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-490-499>

Esipov DA. An Approach to Detecting L0-Optimized Attacks on Image Processing Neural Networks via Means of Mathematical Statistics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024;3(24):490–499. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-490-499>

10. Пименов В.И., Пименов И.В. Интерпретация обученной нейронной сети на основе генетических алгоритмов. *Информационно-управляющие системы*. 2020;6:12–20. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>

Pimenov VI, Pimenov IV. Interpretation of a Trained Neural Network Based on Genetic Algorithms. *Information and Control Systems*. 2020;6:12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>

11. Хван Р.В. Комплексная оценка технического состояния надземных рельсовых крановых путей с использованием искусственных нейронных сетей. *Безопасность труда в промышленности*. 2025;6:7–13. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-7-13>

Khvan RV. Comprehensive Evaluation of the Technical State of Overhead Railway Crane Tracks Using Artificial Neural Networks. *Occupational Safety in Industry*. 2025;6:7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-7-13>

12. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Юсупов А.Р., Короткий А.А. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;1:56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

Panfilov AV, Nikolaev NN, Yusupov AR, Korotkiy AA. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;1:56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

13. Шабля В.О., Коноваленко С.А., Орлов Е.О., Галямин Н.А. Методы семантического анализа на основе моделей машинного обучения с использованием искусственных нейронных сетей. *Наука и реальность*. 2025;1:113–122. URL: [https://zhurnalnir.ru/doc/publ/1\(21\)2025-2.pdf](https://zhurnalnir.ru/doc/publ/1(21)2025-2.pdf) (дата обращения: 23.04.2026).

Shablya VO, Konovalenko SA, Orlov EO, Galyamin NA. Methods of Semantic Analysis Based on Machine Learning Models Using Artificial Neural Networks. *Science & Reality*. 2025;1:113–122. (In Russ.) URL: [https://zhurnalnir.ru/doc/publ/1\(21\)2025-2.pdf](https://zhurnalnir.ru/doc/publ/1(21)2025-2.pdf) (accessed: 23.04.2026).

14. Хазиев М.Л. Диагностика надежности гидравлического привода с применением нейронных сетей. *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2025;1:114–122. URL: <https://seats.elpub.ru/jour/article/view/179> (дата обращения: 23.04.2026).

Khaziev ML. Diagnostics of Hydraulic Drive Reliability Using Neural Networks. *Social-Economic and Technical Systems: Research, Design and Optimization*. 2025;1:114–122. (In Russ.) URL: <https://seats.elpub.ru/jour/article/view/179> (дата обращения: 23.04.2026).

15. Ерохин В.В., Зафиров А.Е. Повышение качества разработки программного обеспечения для технических объектов машиностроения на основе нейронных суррогатов. *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2025;15:89–92. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-89-92>

Erokhin VV, Zafirov AE. Improving The Quality Of Software Development For Technical Objects Of Mechanical Engineering Based On Neural Surrogates. *Mechatronics, Automation and Robotics*. (In Russ.) 2025;15:89–92. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-89-92>

***Об авторе***

**Роман Владимирович Хван**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатации транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [khvanroman@yandex.ru](mailto:khvanroman@yandex.ru)

***Конфликт интересов***, автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

***Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.***

***About the Author:***

**Roman V. Khvan**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [khvanroman@yandex.ru](mailto:khvanroman@yandex.ru)

***Conflict of Interest Statement:*** the author declares no conflict of interest.

***The author has read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 25.12.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 10.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 17.03.2026

# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 004.942; 544.18

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-177-186>

## Методика проведения квантово-химических расчетов активных центров молекулярного комплекса «сорбент — загрязнитель» при поиске компонентов фильтров балластных вод



EDN: YESHPO

А.Н. Цыгута

Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина — филиал «ВГУВТ», г. Астрахань, Российская Федерация

✉ [anna.tsyguta@mail.ru](mailto:anna.tsyguta@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Загрязнение водных экосистем нефтепродуктами, в том числе трансграничный перенос таких загрязнителей с балластными водами судов, требует доработки имеющихся методов очистки. Существующие судовые системы управления балластными водами недостаточно эффективны для удаления растворенных и эмульгированных углеводородов. Перспективным решением может быть использование сорбционных материалов, однако весьма сложно научно обосновать выбор оптимального сорбента для конкретных типов загрязнителей. В связи с этим целью данной работы является представление методики квантово-химического моделирования для прогнозирования эффективности взаимодействия компонентов в системе «сорбент — загрязнитель» на примере целлюлозы и типичных компонентов нефти.

**Материалы и методы.** В качестве модельной системы использован фрагмент целлюлозы (целлобиоза) и молекулы-загрязнители (бензол, фенол и нафталин). Эти вещества были выбраны из-за своей химической структуры и способности имитировать реальные загрязнения окружающей среды. Предварительная оптимизация геометрии и расчет энергетических параметров проводились полуэмпирическим методом PM3 в программе GAMESS. Для верификации результатов использовалась теория функционала плотности с функционалом B3LYP и базисом 6-31G(d). Энергия адсорбции рассчитывалась как разность полных энергий комплекса и изолированных компонентов. Активные центры взаимодействия идентифицировались на основе анализа геометрических параметров, граничных молекулярных орбиталей (НОМО/LUMO) и переноса заряда.

**Результаты исследования.** Рассчитаны ключевые электронные характеристики загрязнителей, показывающие, что нафталин обладает наибольшей поляризуемостью (зазор НОМО-LUMO 8,43 эВ), а фенол — значительным дипольным моментом (1,14 D). Для комплекса «целлобиоза — бензол» определены геометрически и энергетически оптимальные конфигурации. Установлено, что сорбция обеспечивается образованием слабых водородных связей (O...H-C) с расстояниями 1,85–1,91 Å. Энергия адсорбции для наиболее стабильной конфигурации составила 21,27 кДж/моль, что соответствует устойчивому нековалентному взаимодействию. Сформулированы критерии стабильности адсорбционных комплексов (энергетический, структурный, электронный) для разработки предварительных эвристических правил в системе поддержки принятия решений при выборе сорбентов.

**Обсуждение.** Разработанная методика квантово-химического моделирования позволяет количественно оценивать энергию и механизмы межмолекулярного взаимодействия в системе «сорбент — загрязнитель». Показано, что нативная целлюлоза способна эффективно удерживать неполярные ароматические углеводороды за счет дисперсионных сил и слабых водородных связей. Полученные расчетные параметры могут служить основой для научно обоснованного подбора компонентов фильтров балластных вод и других систем очистки с учетом типа загрязнителя, а также для интеграции в информационно-аналитические системы поддержки принятия решений.

**Заключение.** Результаты работы могут быть интегрированы в информационно-аналитические системы поддержки принятия решений при выборе сорбентов для очистки балластных вод, а также служить основой для дальнейших исследований модифицированных форм целлюлозы.

**Ключевые слова:** балластные воды, нефтяные загрязнители, сорбция, целлюлоза, квантово-химические расчеты, метод PM3, энергия адсорбции, молекулярное моделирование

**Благодарности.** Автор благодарит руководителя научного проекта, кандидата технических наук, доцента Л.И. Головацкую и доктора технических наук, доцента, ведущего научного сотрудника отдела научных исследований и цифровизации А.Е. Пластинина, проводивших экспертную оценку результатов исследования совместно с автором статьи.

**Для цитирования.** Цыгута А.Н. Методика проведения квантово-химических расчетов активных центров молекулярного комплекса «сорбент — загрязнитель» при поиске компонентов фильтров балластных вод. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):177–186. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-177-186>

*Original Theoretical Research*

## Method for Quantum-Chemical Calculations of Active Centers of the “Sorbent — Pollutant” Molecular Complex in the Search for Ballast Water Filter Components

Anna N. Tsyguta  

Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F. M. Apraksin – branch of Volga State University of Water Transport, Astrakhan, Russian Federation

 [anna.tsyguta@mail.ru](mailto:anna.tsyguta@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Pollution of aquatic ecosystems by petroleum products, including the transboundary transport of pollutants from ships' ballast water, requires improvement of cleaning methods. Existing shipboard ballast water management systems are not sufficiently effective in removing dissolved and emulsified hydrocarbons. A promising solution is the use of sorption materials. However, choosing the optimal sorbent for specific pollutants is a challenging task that requires scientific research. In this study, we aimed to demonstrate a quantum chemical modeling technique to predict the effectiveness of the “sorbent — pollutant” interaction using cellulose and typical oil components as examples.

**Materials and Methods.** A fragment of cellulose (cellobiose) and contaminant molecules: benzene, phenol, and naphthalene were used as a model system. These substances were chosen due to their chemical structure and ability to simulate real environmental pollution. Preliminary optimization of the geometry and calculation of energy parameters were performed using the semi-empirical PM3 method in the GAMESS program. To verify the results, the density functional theory with the B3LYP functional and the 6-31G(d) basis was used. The adsorption energy was calculated as the difference between the total energies of the complex and the isolated components. The active interaction centers were identified based on the analysis of geometric parameters, boundary molecular orbitals (HOMO/LUMO), and charge transfer.

**Results.** The key electronic characteristics of pollutants were calculated, showing that naphthalene had the highest polarizability (HOMO-LUMO gap 8.43 eV), and phenol had a significant dipole moment (1.14 D). Geometrically and energetically optimal configurations were determined for the cellobiose-benzene complex. It was established that sorption was provided by the formation of weak hydrogen bonds (O...H-C) with distances of 1.85-1.91 Å. The adsorption energy for the most stable configuration was 21.27 kJ/mol, which corresponded to a stable non-covalent interaction. Criteria for the stability of adsorption complexes (energy, structural, electronic) were formulated for the development of preliminary heuristic rules in the decision support system for the selection of sorbents.

**Discussion.** The developed quantum chemical modeling technique made it possible to quantify the energy and mechanisms of intermolecular interaction in the “sorbent — pollutant” system. It was shown that native cellulose was able to effectively retain nonpolar aromatic hydrocarbons due to dispersion forces and weak hydrogen bonds. The calculated parameters can serve as the basis for a scientifically sound selection of components for ballast water filters and other purification systems, taking into account the type of pollutant, as well as for integration into information and analytical decision support systems.

**Conclusion.** The results of the work can be integrated into information and analytical decision support systems for the selection of sorbents for ballast water treatment, as well as serve as a basis for further research of modified forms of cellulose.

**Keywords:** ballast water, oil pollutants, sorption, cellulose, quantum chemical calculations, PM3 method, adsorption energy, molecular modeling

**Acknowledgements.** The author would like to thank the Head of the scientific project, L.I. Golovatskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, and A.E. Plastinin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher at the Department of Scientific Research and Digitalization, who conducted an expert assessment of the results of the research together with the author.

**For Citation.** Tsyguta AN. Method for Quantum-Chemical Calculations of Active Centers of the “Sorberent — Pollutant” Molecular Complex in the Search for Ballast Water Filter Components. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):177–186. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-177-186>

**Введение.** Загрязнение водных экосистем нефтью и нефтепродуктами представляет собой одну из глобальных экологических проблем. Интенсивная добыча, переработка и транспортировка углеводородов неизбежно приводят к их попаданию в поверхностные и сточные воды [1]. Последствия такого загрязнения носят катастрофический характер: нефтяные пленки нарушают газообмен, снижая концентрацию растворенного кислорода и вызывая гипоксию у гидробионтов, а водорастворимые фракции оказывают прямое токсическое воздействие. Особую опасность представляют полициклические ароматические углеводороды, действующие как клеточные яды и вызывающие острые и хронические отравления у живых организмов [2].

Токсикологическое воздействие нефтепродуктов является комплексным и многоуровневым [3]. Проведенный анализ литературы показал, что даже сублетальные концентрации могут вызывать у гидробионтов нарушения физиологических функций: от сердечной деятельности и метаболизма холестерина до поведенческих реакций, таких как ориентация и избегание опасности [4]. Наиболее уязвимыми оказываются ранние стадии развития организмов (икра, личинки, молодь), для которых такое воздействие загрязнителей приводит к морфологическим изменениям, снижению выживаемости и как следствие — к сокращению численности видов [2], у высших животных, включая млекопитающих, — к иммуносупрессии, репродуктивным сбоям и патологиям внутренних органов [4].

Следует также подчеркнуть, что токсический эффект существенно различается в зависимости от химического состава (фракции) загрязнителя. Так, экспериментальные данные свидетельствуют, что тяжелые масляные фракции и нефтесодержащие отходы проявляют токсичность для гидробионтов (например для ракообразных *Daphnia magna*, как показано в работе [5]) при концентрациях на один–два порядка ниже, чем легкие бензиновые фракции. Это означает, что оценка риска и разработка методов очистки должны учитывать не только общее содержание нефтепродуктов, но и их молекулярный состав.

С учетом вышесказанного был проведен теоретический сбор информации о качестве поверхностных вод<sup>1</sup> в районе бассейна реки Волги, в результате были получены данные о превышении за последние годы рыбохозяйственных нормативов в несколько раз [6]. Следовательно, в таких условиях при заборе балластной воды судно непреднамеренно включает нефтяные загрязнители в состав балласта. При последующем сбросе воды в другом районе эти вещества переносятся на новое место, что создает дополнительную нагрузку на локальные экосистемы, усиливая токсическое воздействие на гидробионтов и нарушая природные биогеохимические процессы. В условиях интенсивного судоходства данный фактор формирует экологический риск, сопоставимый по значимости с переносом биологических инвазий. Дополнительный риск возникает в районах разливов нефти, где загрязнители, включая растворенные и эмульгированные фракции, могут длительное время сохраняться в толще воды и при ее заборе попадать при ликвидации аварии в балластные цистерны. Таким образом, можно утверждать, что балластные воды выступают активным трансграничным переносчиком уже существующего загрязнения.

Международная морская организация (ИМО) в рамках Конвенции по управлению балластными водами устанавливает нормативы сброса<sup>2</sup>, основной целью которых является контроль переноса инвазивных видов. Однако эти нормы косвенно регламентируют содержание химических загрязняющих веществ, включая нефтяные углеводороды. Существующие судовые системы очистки балластных вод, одобренные ИМО, в первую очередь направлены на обеззараживание воды и уничтожение биологических организмов (зоопланктона, фитопланктона, бактерий). При этом их эффективность в отношении удаления растворенных и эмульгированных химических загрязнителей, в частности нефтепродуктов, часто оказывается недостаточной [7]. Поэтому напрашивается вывод, что требуется модификация или дополнение существующих систем очистки балластных вод технологическими модулями, целенаправленно удаляющими химические загрязнители, в частности нефтепродукты. В качестве решения проблемы наполнения технологического модуля очищающими компонентами могут выступать сорбционные методы, которые позволяют извлекать широкий спектр нефтяных углеводородов из водных сред [7].

<sup>1</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации». URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения: 27.01.2026)

<sup>2</sup> Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года (с изменениями на 20 ноября 2020 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902152089> (дата обращения: 03.05.2025).

Однако многообразие доступных сорбентов (от природных до синтетических) требует применения научно обоснованного алгоритма для определения выбора очищающего компонента. Такой выбор должен учитывать не только поглощающую емкость сорбента и его стабильность в условиях солености и качки, а также экономические аспекты, но и селективность материала по отношению к конкретным классам углеводородов.

В данной работе в качестве модельного объекта для демонстрации принципов системного подхода рассматривается целлюлоза. Этот возобновляемый биополимер способен к целенаправленной химической модификации и усилению гидрофобных свойств.

Цель исследования — на примере целлюлозы и типичных компонентов нефтепродуктов продемонстрировать методику проведения квантово-химических расчетов, поиска активных центров очистителя и загрязнителя на основе компьютерного моделирования межмолекулярных взаимодействий и расчета критерия эффективности сорбента. Полученные расчетные параметры могут быть использованы в качестве количественной основы для формирования правил нечеткого логического вывода, что позволит осуществлять научно обоснованный подбор материалов под конкретные условия загрязнения балластных вод [8].

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решить следующие задачи:

- сформировать набор модельных молекулярных систем, включающий в себя фрагменты очистителей (например, целлюлозы), а также представителей ключевых классов нефтяных загрязнителей (например бензола, нафталина, фенола).

- описать функциональные зависимости для проведения расчета энергетических параметров молекулярных комплексов (систем) для подтверждения образования устойчивой водородной связи между молекулами, что позволит определить активные центры молекул.

- смоделировать молекулярные комплексы и провести ряд квантово-химических расчетов для определения энергетических и геометрических параметров образования молекулярных комплексов в результате построения водородных связей.

- на основании проведенных квантово-химических расчетов (задача 3) вычислить энергетические параметры молекулярных комплексов для подтверждения образования устойчивой водородной связи между молекулами и определить активные центры молекул.

- описать функциональные зависимости для определения коэффициентов эффективности сорбции для каждой пары «сорбент — загрязнитель».

**Материалы и методы.** В качестве модельной системы для исследования выбрана пара «целлюлоза — представитель нефтяного загрязнителя». Ввиду значительного размера полимерной цепи целлюлозы для квантово-химического моделирования использован ее минимальный повторяющийся фрагмент — целлобиоза ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ). Данный фрагмент сохраняет ключевые функциональные группы и конформационные особенности полимерной цепи, что делает его репрезентативной моделью, адекватно отражающей сорбционные свойства нативной целлюлозы [9]. В качестве модельных загрязнителей выбраны представители основных классов углеводородов: бензол ( $C_6H_6$ ), фенол ( $C_6H_6O$ ) и нафталин ( $C_{10}H_8$ ).

Для моделирования молекулярных систем и определения их энергетических и геометрических параметров использовалась иерархия приближенных методов, основанных на стационарном уравнении Шредингера для многоэлектронной системы:

$$\hat{H}\psi = E\psi, \quad (1)$$

где  $\hat{H}$  — гамильтониан системы;  $\psi$  — волновая функция;  $E$  — энергия стационарного состояния [10].

Точное решение этого уравнения для систем, содержащих более двух электронов, невозможно, что требует применения приближенных методов, среди которых наибольшее распространение получили методы, основанные на теории самосогласованного поля (SCF). Для предварительной оптимизации геометрии изолированных молекул и перебора различных пространственных ориентаций молекул использовался полуэмпирический метод РМЗ (Parametric Method 3) [11]. В его основе лежит решение матричного уравнения Рутаана-Холла:

$$FC = SC\varepsilon, \quad (2)$$

где  $F$  — матрица Фока;  $C$  — матрица коэффициентов молекулярных орбиталей;  $S$  — матрица перекрывания;  $\varepsilon$  — диагональная матрица орбитальных энергий.

Интегралы, входящие в матрицу  $F$ , параметризованы на основе экспериментальных данных, что позволяет достичь приемлемой точности при значительно меньших вычислительных затратах, по сравнению с *ab initio* методами. Оптимизация геометрии проводилась алгоритмом *eigenvector following* (EF) в программе GAMESS до достижения нормы градиента менее 0,001 ккал/(моль Å). На рис. 1 показан результат моделирования молекулярного взаимодействия компонентов нефтепродуктов с целлобиозой, стрелочками указаны атомы, которые способны образовывать связь.

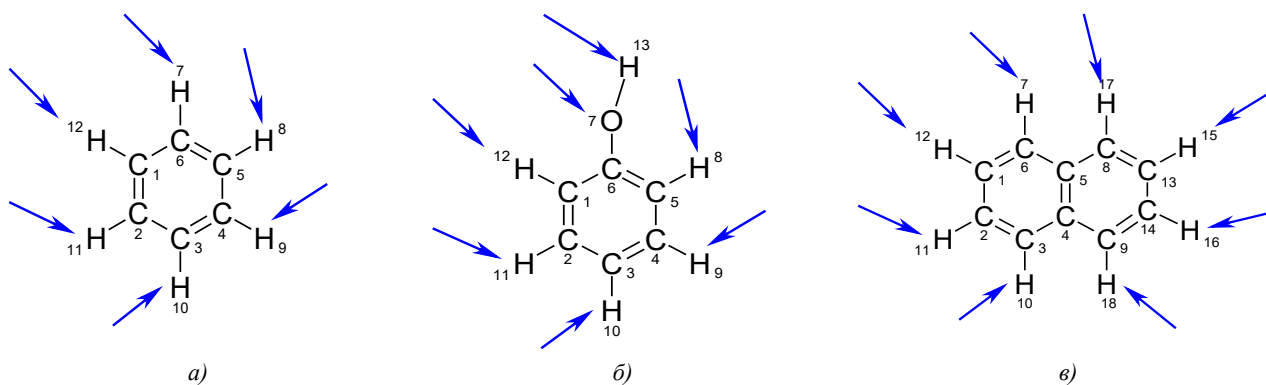


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов нефтепродуктов с целлюбиозой:  
 а — бензол; б — фенол; в — нафталин

Для получения более точных энергетических параметров и анализа электронной структуры использовалась теория функционала плотности (Density Functional Theory, DFT) [12]. В рамках подхода Кона-Шэма задача сводится к решению системы одноэлектронных уравнений:

$$\left[ -\frac{1}{2}\nabla^2 + V_{eff}(r) \right] \phi_i(r) = \varepsilon_i \phi_i(r), \quad (3)$$

где эффективный потенциал  $V_{eff}(r) = V_{ext}(r) + \int \frac{\rho(r')}{|r-r'|} dr' + V_{XC}[\rho(r)]$  включает в себя обменно-корреляционный функционал  $V_{XC}$ .

В данной работе использовался гибридный функционал B3LYP [13] с базисным набором 6-31G(d), обеспечивающий хорошее соотношение точности и вычислительной эффективности для органических систем с нековалентными взаимодействиями.

Энергией адсорбции (связи)  $\Delta E_{адс}$  для молекулярного комплекса «сорбент (А) — загрязнитель (В)» называется разность между полной энергией оптимизированного комплекса (АВ) и суммой энергий его изолированных, также оптимизированных компонентов:

$$\Delta E_{адс} = E(AB) - [E(A) + E(B)]. \quad (4)$$

Отрицательное значение  $\Delta E_{адс}$  свидетельствует об энергетической выгоде процесса образования комплекса.

В методе РМЗ полная энергия системы ( $E_{РМЗ}$ ) формально представлена как сумма двух крупных компонентов: потенциальной энергии электронов ( $E_{el}$ ) и энергии отталкивания атомных остовов ( $E_{rep}$ ), которые выводятся программой раздельно. Поэтому для строгого расчета  $\Delta E_{адс}$  в рамках РМЗ необходимо использовать разностную форму:

$$\Delta E_{адс} = [E_{el}(AB) - E_{el}(A) - E_{el}(B)] + [E_{rep}(AB) - E_{rep}(A) - E_{rep}(B)]. \quad (5)$$

Для перевода результата из электрон-вольт (эВ) в килоджоули на моль используется коэффициент 96,485 кДж моль<sup>-1</sup>. Таким образом, итоговая рабочая формула принимает вид:

$$\Delta E_{адс} \left( \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right) = 96,485 \times ([E_{el}(AB) - E_{el}(A) - E_{el}(B)] + [E_{rep}(AB) - E_{rep}(A) - E_{rep}(B)]). \quad (6)$$

Рассмотрим расчет  $\Delta E_{адс}$  для наиболее стабильной конфигурации комплекса целлюбиоза (Ц) с бензолом (Б). После расчета конфигурации комплексов в GAMESS были получены следующие значения энергий:

$$\begin{aligned} E_{el}(\text{Ц}) &= -291467,1394 \text{ эВ}, & E_{rep}(\text{Ц}) &= 218000,000 \text{ эВ}, \\ E_{el}(\text{Б}) &= -3162,4272 \text{ эВ}, & E_{rep}(\text{Б}) &= 2359,6231 \text{ эВ}, \\ E_{el}(\text{ЦБ}) &= -294632,5666 \text{ эВ}, & E_{rep}(\text{ЦБ}) &= 220362,4026 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Подставив значения в формулу (6), получим:

$$\begin{aligned} \Delta E_{el} &= (-294632,5666) - (-291467,1394) - (-3162,4272) = -3,0000 \text{ эВ}, \\ \Delta E_{rep} &= 220362,4026 - 218000,0000 - 2359,6231 = 2,7795 \text{ эВ}, \\ \Delta E_{адс}(\text{эВ}) &= -3,0000 + 2,7795 = -0,2205 \text{ эВ}, \\ \Delta E_{адс}(\text{кДж/моль}) &= 96,485 \times (-0,2205) \approx -21,27 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

Полученное значение  $\Delta E_{\text{алс}}$  соответствует энергии средней водородной связи. Активные центры взаимодействия идентифицировались на основе анализа трех аспектов:

- нахождение нековалентных взаимодействий с межмолекулярными расстояниями, меньшими суммы Ван-дер-Ваальсовых радиусов, и углами, характерными для водородных связей (О-Н...О);
- анализ граничных молекулярных орбиталей (НОМО/LUMO), ширины запрещенной зоны ( $\Delta E$ ) и дипольного момента ( $\mu$ ) изолированных молекул загрязнителей для оценки их поляризуемости, электронодонорных и электроноакцепторных свойств;
- расчет величины и направления переноса заряда ( $\Delta q$ ) между фрагментами по методу Малликена как индикатора донорно-акцепторного взаимодействия.

**Результаты исследования.** Для корректной интерпретации механизмов сорбции предварительно были охарактеризованы ключевые параметры изолированных молекул загрязнителей, рассчитанные методом РМЗ (таблица 1). Значения теплоты образования  $\Delta H_f$  отражают различную термодинамическую стабильность: фенол является наиболее стабильным соединением  $\Delta H_f = -91,00$  кДж/моль, тогда как бензол и нафталин имеют положительные теплоты образования.

Электронные параметры имеют ключевое значение для прогнозирования реакционной способности. Энергия высшей занятой молекулярной орбитали (НОМО) характеризует электронодонорную способность. Наиболее низкое значение НОМО у бензола ( $-9,7$  эВ) указывает на его повышенную склонность к участию в донорно-акцепторных взаимодействиях в качестве донора электронов. Важно отметить, что низшая свободная молекулярная орбиталь (LUMO) нафталина также имеет отрицательную энергию ( $-0,41$  эВ), что свидетельствует о его способности не только отдавать, но и принимать электроны при образовании межмолекулярного комплекса.

Разность энергий НОМО и LUMO ( $\Delta E$ ), являющаяся мерой химической стабильности и поляризуемости, минимальна для нафталина ( $8,43$  эВ). Фенол, обладающий значительным дипольным моментом ( $1,14$  D) и средней величиной энергии НОМО ( $-9,19$  эВ), проявляет свойства, типичные для молекул, способных к образованию направленных водородных связей.

Таблица 1

Квантово-химические характеристики модельных загрязнителей (метод РМЗ)

Параметры	Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Фенол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O)	Нафталин (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )
Теплота образования, $\Delta H_f$ (кДж/моль)	99,81	-91,00	167,70
Энергия НОМО, $E$ (эВ)	-9,7	-9,18	-8,84
Энергия LUMO, $E$ (эВ)	0,37	0,29	-0,41
Зазор НОМО-LUMO, $\Delta E$ (эВ)	10,08	9,47	8,43
Дипольный момент, $\mu$ (D)	~0,01	1,14	~0,001

*Примечание:* значения рассчитаны на основе выходных данных программы GAMESS

По данным таблицы 1, рассчитанные методом РМЗ параметры модельных загрязнителей, позволяют прогнозировать их сорбционное поведение. Нафталин, обладающий наиболее высокой энергией НОМО ( $-8,84$  эВ) и минимальным зазором НОМО-LUMO ( $8,43$  эВ), демонстрирует наибольшую поляризуемость и склонность к нековалентным взаимодействиям. Это обусловлено наличием двух конденсированных ароматических колец, которые создают большую площадь межмолекулярного контакта, а его электроны распределены по всей структуре, что усиливает дисперсионные взаимодействия (силы Лондона). Бензол, являясь более простой ароматической системой, имеет более низкое значение НОМО ( $-9,70$  эВ) и более широкий зазор НОМО-LUMO ( $10,08$  эВ), что указывает на его меньшую поляризуемость и реакционную способность, по сравнению с нафталином. Особый интерес представляет фенол, у которого отрицательные значения теплоты образования ( $-91,00$  кДж/моль) свидетельствует о его термодинамической стабильности, при этом наличие гидроксильной группы придает молекуле значительный дипольный момент ( $1,14$  D) и смещает механизм взаимодействия от неспецифических дисперсионных сил к направленным водородным связям. Полученный ряд значений  $\Delta E$ , нафталин ( $8,43$  эВ) < фенол ( $9,47$  эВ) < бензол ( $10,08$  эВ), коррелирует с ожидаемой селективностью сорбции на полярных и неполярных поверхностях.

Для детального квантово-химического моделирования в качестве модельного загрязнителя был выбран бензол. Данный выбор обусловлен тем, что среди рассматриваемых ароматических соединений бензол характеризуется максимальной шириной запрещенной зоны ( $\Delta E = 10,08$  эВ) и, следовательно, наименьшей поляризуемостью, и минимальной склонностью к межмолекулярным взаимодействиям (таблица 1). Таким образом, бензол представляет собой более сложный для сорбции объект. Демонстрация эффективности сорбции в отношении бензола является консервативной оценкой: если сорбент на основе целлюлозы образует стабильные комплексы с бензолом, то заведомо более поляризуемые соединения (нафталин, его производные) и соединения, способные к специфическим взаимодействиям (фенол), будут сорбироваться не хуже, а с высокой вероятностью — лучше.

Для комплекса «целлюбиоза с бензолом» было смоделировано и оптимизировано несколько межмолекулярных взаимодействий (МВ) (рис. 2). Анализ геометрических параметров оптимизированных структур (таблица 2) показывает, что стабилизация комплексов во всех случаях обеспечивается за счет образования направленных водородных связей между атомами водорода ароматического кольца бензола и атомами кислорода гидроксильных групп целлюбиозы (O...H–C). Расстояния O...H (1,85–1,91 Å) находятся в диапазоне, характерном для слабых водородных связей, что подтверждает данный тип МВ как основной механизм сорбции. В таблице 2 показаны относительные энергии системы и величина переноса заряда ( $\Delta q$ ) для наиболее стабильных взаимодействий комплекса «целлюбиоза с бензолом».

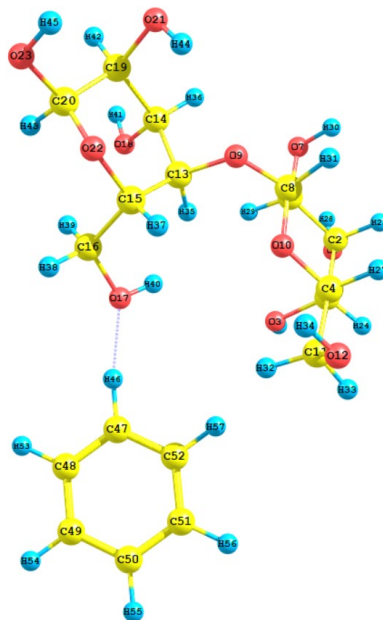


Рис. 2. Молекулярное взаимодействие бензола с целлюбиозой при образовании водородной связи O17...H46

Таблица 2

Энергетические параметры взаимодействия комплекса «целлюбиоза с бензолом»

МВ	Тип взаимодействия	$\Delta E_{\text{адс}}$ , кДж/моль	$R$ , Å	$\Delta q$ , $\bar{e}$
1	O17...H46	– 21,27	1,85	– 0,155
2	O18...H46	– 16,40	1,91	– 0,143
3	O12...H46	– 13,50	1,85	– 0,157
4	O3...H46	– 13,09	1,86	– 0,138
5	O22...H46	– 12,48	1,87	– 0,154
6	O23...H46	– 9,78	1,88	– 0,132
7	O7...H46	– 9,27	1,88	– 0,122
8	O21...H46	– 9,01	1,88	– 0,129
9	O5...H46	– 8,92	1,90	– 0,121

*Примечание:* условные обозначения, используемые при описании структур (МВ):  $R$ , Å — расстояние между атомами;  $\Delta E_{\text{адс}}$ , кДж/моль — энергия адсорбции;  $\Delta q$ ,  $\bar{e}$  — разность зарядов атомов.

Данные, представленные в таблице 2, свидетельствуют о наличии нескольких локальных минимумов на потенциальной энергетической поверхности комплекса «целлюбиоза с бензолом». Наиболее стабильной является конфигурация МВ1 ( $\Delta E_{\text{адс}} = -21,27$  кДж/моль), в которой реализуется водородная связь O17...H46. Конфигурация МВ2 ( $\Delta E_{\text{адс}} = -16,40$  кДж/моль) с взаимодействием O18...H46 характеризуется меньшей энергетической выгодностью, однако также представляет собой устойчивый сорбционный комплекс. Отрицательные значения переноса заряда  $\Delta q$  (от – 0,157 до – 0,121  $\bar{e}$ ) во всех исследованных МВ указывают на направленный поток электронной плотности с молекулы бензола на целлюбиозу, что характерно для взаимодействий, в которых кислородсодержащие группы целлюлозы выступают в роли слабых электронных акцепторов. Конфигурация МВ3, несмотря на наибольшую величину переноса заряда ( $\Delta q = -0,157 \bar{e}$ ), характеризуется менее выгодной энергией адсорбции ( $\Delta E_{\text{адс}} = -13,50$ ), что может быть связано с нарушением оптимальной геометрии из-за стерических затруднений или неоптимальной ориентации молекулы.

Проведенный согласно формуле (6) расчет абсолютной энергии адсорбции для наиболее стабильной конфигурации МВ1 дал значение  $\Delta E_{\text{адс}} = -21,27$  кДж/моль. Эта величина соответствует энергии средней водородной связи и подтверждает термодинамическую выгодность образования комплекса. Полученное значение находится в диапазоне, характерном для устойчивых нековалентных взаимодействий органических молекул, и согласуется с литературными данными для подобных систем [14]. Применение предложенных критериев стабильности к полученным результатам показывает следующее:

1. Энергетический критерий ( $\Delta E_{\text{адс}} < -8$  кДж/моль) выполняется для всех рассмотренных комплексов целлобиозы с бензолом, что свидетельствует о достаточной прочности образующегося молекулярного взаимодействия для практического использования в сорбционных процессах.

2. Структурный критерий ( $R < 2,2$  Å для водородных связей) указывает на типичные для образования водородных связей взаимодействия, что соответствует образованию молекулярных комплексов.

3. Электронный критерий ( $\Delta q \neq 0$  e) выполняется для всех исследованных конфигураций, подтверждая существенный вклад электростатических взаимодействий в общую энергию адсорбции. В ходе исследования была разработана и апробирована методика квантово-химического моделирования для прогнозирования [15] эффективности сорбентов в системах очистки балластных вод. На примере модельной системы «целлобиоза (фрагмент целлюлозы) — типичные нефтяные загрязнители (бензол, фенол, нафталин)» были решены поставленные авторами задачи.

**Обсуждение.** Полученные результаты имеют большое значение для разработки алгоритма подбора компонентов фильтров балластных вод. Выявленная зависимость между электронными характеристиками загрязнителя (НОМО,  $\Delta E$ ,  $\mu$ ) и энергией адсорбции позволяет прогнозировать эффективность сорбента на основе квантово-химических расчетов. В частности, для неполярных ароматических загрязнителей (бензол, нафталин) нативная целлобиоза демонстрирует удовлетворительную эффективность за счет взаимодействий, тогда как для полярных соединений (фенол) может потребоваться химическая модификация сорбента для усиления специфических взаимодействий. Величина переноса заряда  $\Delta q$  может служить дополнительным диагностическим параметром при оценке механизма сорбции и селективности материала.

Сопоставление результатов с данными предыдущих исследований молекулярных комплексов [14], где энергии адсорбции для систем с водородными связями варьировались от  $-3,4$  до  $-20,8$  кДж/моль, показывает, что взаимодействие целлобиозы с бензолом является более энергетически выгодным.

В дополнение к оценке эффективности сорбентов необходимо учитывать их стоимость и безопасность при осуществлении выбора. Стоимость сорбента должна быть соразмерна его эффективности и доступности. При этом необходимо анализировать не только начальные затраты, но и потенциальные расходы на обслуживание и утилизацию. Важно, чтобы используемые сорбенты не приводили к негативным последствиям для экосистемы как в процессе их применения, так и по завершении эксплуатации. Оценка воздействия на окружающую среду должна стать неотъемлемой составляющей подбора сорбентов. При выборе следует учитывать потенциальные риски для здоровья человека, связанные с использованием определенных сорбентов. Необходимо проводить анализы на предмет возможного высвобождения вредных веществ в окружающую среду. Таким образом, интеграция данных факторов в процесс подбора позволит обеспечить не только высокую эффективность очистки, но и устойчивое применение сорбентов, что соответствует принципам устойчивого развития.

На основе выявленных закономерностей могут быть сформулированы предварительные эвристические правила для модуля нечеткого логического вывода.

**Заключение.** Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Сформирован набор репрезентативных модельных систем.
2. Разработана и верифицирована строгая методология расчета энергии адсорбции ( $\Delta E_{\text{адс}}$ ) на основе данных полуэмпирического метода РМЗ (формулы 4–6), позволившая получить значение  $-21,27$  кДж/моль для наиболее стабильного МВ «целлобиоза с бензолом»;
3. Определены ключевые энергетические и электронные характеристики загрязнителей (таблица 1), показавшие, что нафталин обладает наибольшей склонностью к нековалентным взаимодействиям (НОМО =  $-8,84$  эВ,  $\Delta E = 8,43$  эВ);
4. Установлены три критерия стабильности адсорбционных комплексов: энергетический ( $\Delta E_{\text{адс}} < -8$  кДж/моль), структурный ( $R < 2,2$  Å) и электронный ( $\Delta q \neq 0$  e). Показано, что нативная целлобиоза способна эффективно удерживать неполярные ароматические углеводороды за счет дисперсионных сил и слабых водородных связей, что подтверждает перспективность ее использования в сорбционных фильтрах балластных вод. Полученные расчетные параметры могут служить основой для научно обоснованного подбора компонентов фильтров и интеграции в информационно-аналитические системы поддержки принятия решений.

**Список литературы / References**

1. Акимова А.С., Филиппова Л.С. Последствия загрязнения поверхностных и сточных вод нефтью и нефтепродуктами. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022;11(125). <https://www.doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.102>  
Akimova AS, Filippova LS. Consequences of Surface and Wastewater Pollution by Oil and Petrochemicals. *International Research Journal*. 2022;11(125). (In Russ.) <https://www.doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.102>
2. Goncharuk VV, Kovalenko VF, Holovkov AM, Nanieva AV, Osmalena OV. Determination of the Toxicity of Petroleum Products for Aquatic Organisms Using Comprehensive Bioassay. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2022;44(1):21–25. <https://doi.org/10.3103/s1063455x22010039>
3. Хамидуллина Е.А., Васильева В.В. Оценка влияния процессов нефтедобычи на здоровье населения нефтедобывающих районов Иркутской области. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):7–16. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-7-16>  
Khamidullina EA, Vasileva VV. Assessment of the Impact of Oil Production Processes on the Health of the Population of Oil-Producing Areas of the Irkutsk Region. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):7–16. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-7-16>
4. Murawski SA, Grosell M, Smith C, Sutton T, Halanych KM, Shaw RF, et al. Impacts of Petroleum, Petroleum Components, and Dispersants on Organisms and Populations. *Oceanography*. 2021;34(1):136–151. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2021.122>
5. Фомичева Г.П., Насибулина Б.М., Камакин А.М., Федорова И.В. Изменение физиологической активности *Daphniamagna*, Straus под воздействием различных фракций нефтепродуктов. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2017;(1):124–130  
Fomicheva GP, Nasibulina BM, Kamakin AM, Fyodorova IV. Change of Physiological Activiti of *Daphnia Magna*, Straus under the Influence of Different Factions of Oil Products. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2017;(1):124–130 (In Russ.)
6. Цыгута А.Н., Головацкая Л.И. Оценка состава загрязняющих веществ балластных вод по различным участкам реки Волги. В: *Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Актуальные решения проблем водного транспорта»*. Астрахань, 29–31 мая 2024 года. Астрахань: Волжский государственный университет водного транспорта; 2024. С. 191–194.  
Tsyguta AN, Golovatskaya LI. Assessment of the Composition of Pollutants in Ballast Water in Various Sections of the Volga River. In: *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Actual Solutions to Water Transport Problems”*. Astrakhan, May 29–31, 2024. Astrakhan: Volga State University of Water Transport; 2024. P. 191–194. (In Russ.)
7. Цыгута А.Н., Головацкая Л.И. Эффективность метода сорбции при поиске очистителей к химическим загрязнителям балластных вод. *Каспийский научный журнал*. 2025;1(6):2–9.  
Tsyguta AN, Golovatskaya LI. The Effectiveness of the Sorption Method in the Search for Purifiers for Chemical Pollutants in Ballast Water. *Kaspijskij Nauchnyj Zhurnal*. 2025;1(6):2–9. (In Russ.)
8. Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Цыгута А.Н., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода. *Морские интеллектуальные технологии*. 2024;4–2(66):147–158. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.071>  
Golovackaya LI, Sorokin AA, Tsyguta AN, Plastinin AE, Otdelkin NS. Implementation of a Method for Forming a Comprehensive Assessment of the Preference for the Selection of Ballast Water Filter Components Based on the Provisions of a Fuzzy Logical Conclusion. *Marine Intellectual Technologies*. 2024;4–2(66):147–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.071>
9. Bobo Cao, Chao Wang, Zhengyu Zhou. Insights into the Interactions between Cellulose and Biological Molecules. *Carbohydrate Research*. 2023;523:108738. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2022.108738>
10. Беляева И.Н., Корсунов Н.И., Чеканов Н.А., Чеканов А.Н. Полуклассические расчеты энергетических уровней и волновых функций гамильтоновых систем с одной и несколькими степенями свободы на основе метода классических и квантовых нормальных форм. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023;(15):255–263. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.255>  
Belyaeva IN, Korsunov NI, Chekanov NA, Chekanov AN. Semi-Classical Calculations of Energy Levels and Wave Functions of Hamiltonian Systems with One and Several Degrees of Freedom Based on the Method of Classical and Quantum Normal Forms. *Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*. 2023;(15):255–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.255>

11. Головацкая Л.И., Тризно Е.В., Смирнова Ю.А., Тризно М.Н. Молекулярное моделирование и экспериментальное подтверждение поиска средств коррекции токсического воздействия сероводорода. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023;25(1):37–43. URL: <https://www.extrememedicine.ru/jour/article/view/87> (дата обращения: 26.05.2026)

Golovatskaya LI, Trizno EV, Smirnova YuA, Trizno MN. Molecular Modeling and Experimental Confirmation of the Search for Agents Mitigating Toxic Action of Hydrogen Sulfide. *Extreme Medicine*. 2023;25(1):37–43. URL: <https://www.extrememedicine.ru/jour/article/view/87> (accessed: 26.05.2026)

12. Xiaobin Liao, Ruihu Lu, Lixue Xia, Qian Liu, Huan Wang, Kristin Zhao, et al. Density Functional Theory for Electrocatalysis. *Energy and Environmental Materials*. 2022;5(1):157–185. <https://doi.org/10.1002/eem2.12204>

13. Чачков Д.В., Михайлов О.В. Оценка комплексообразующей способности дициана путем квантово-химического расчета методом DFT B3LYP. *Вестник Казанского технологического университета*. 2010;(7):474–476.

Chachkov DV, Mikhailov OV. Evaluation of Complexing Ability of Dicyan by Quantum-Chemical Calculation Using the DFT B3LYP Method. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2010;(7):474–476. (In Russ.)

14. Simončić M, Urbic T. Hydrogen Bonding between Hydrides of the Upper-Right Part of the Periodic Table. *Chemical Physics*. 2018;507:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2018.03.036>

15. Пластинин А.Е., Каленков А.Н. Прогнозирование разливов нефти с судов в Оленекском заливе. *Научные проблемы водного транспорта*. 2023;75(2):217–228. URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/379> (дата обращения: 26.05.2026)

Plastinin AE, Kalenkov AN. Forecasting Oil Spills from Ships in Oleneksky Bay. *Russian Journal of Water Transport*. 2023;75(2):217–228. (In Russ.) URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/379> (accessed: 26.05.2026)

**Об авторе:**

**Анна Николаевна Цыгута**, старший преподаватель кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины» Каспийского института морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина — филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ» (414000, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Никольская, 6), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [anna.tsyguta@mail.ru](mailto:anna.tsyguta@mail.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Anna N. Tsyguta**, Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Natural Sciences, Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F. M. Apraksin – branch of FSBEI HE “Volga State University of Water Transport” (6, Nikolskaya St., Astrakhan, 414000, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [anna.tsyguta@mail.ru](mailto:anna.tsyguta@mail.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

**The author has read and approved the final version of manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 13.01.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 09.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 19.03.2026