

Рецензируемый научно-практический журнал

ISSN 2587-5728 (Print)

ISSN 3034-2791 (Online)

ВОЙСКА
РХБ
ЗАЩИТЫ
ВОЕН

ВОЙСКА РХБ ЗАЩИТЫ

**JOURNAL OF NBC
PROTECTION CORPS**

ТЕМА НОМЕРА:

Вооружения и средства войск РХБ защиты

ISSUE SUBJECT:

Weapons and Means of NBC Protection Troops

Том / Vol.

9

№ / No.

3

ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ
JULY – SEPTEMBER

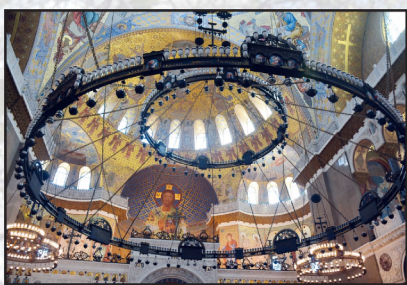
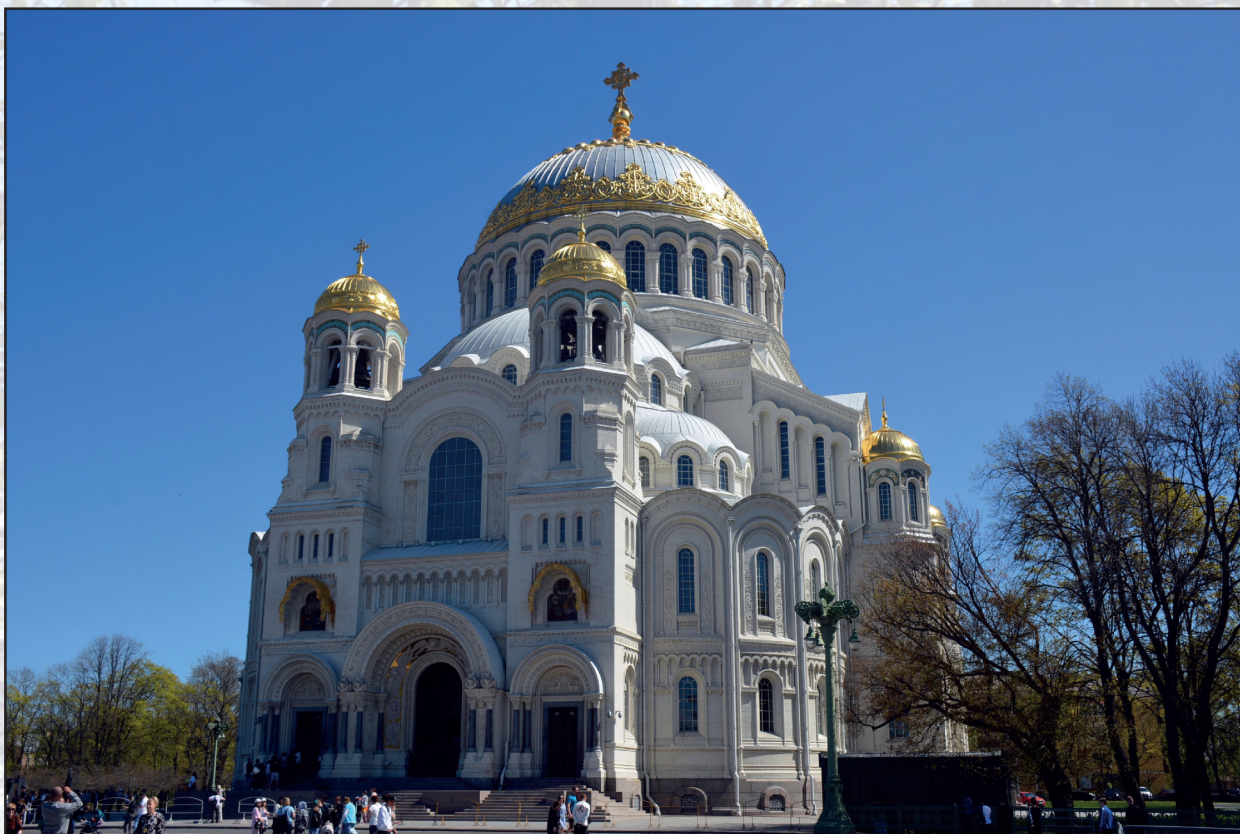
2025

www.nbsprot.ru



Наша замечательная Россия

Морской Никольский собор (Кронштадт)



Морской Никольский собор (Морской собор святителя Николая Чудотворца, Ставропигиальный Никольский морской собор) – православный храм в Кронштадте, последний и самый крупный из морских соборов, построенных в Российской империи. Сооружен в 1903–1913 гг. в неовизантийском стиле по проекту архитектора В.А. Косякова (1861–1921). Назван в честь покровителя мореплавателей Николая Чудотворца. Храм повторяет объемно-планировочную структуру собора Святой Софии в Константинополе. По абсолютным размерам кронштадтский храм несколько меньше своего византийского прототипа. Росписи и мозаики на фасадах и в интерьерах Морского собора исполнены также под влиянием образцов византийского искусства. Морской собор – второй храм в мире (после собора Святой Софии), где удалось реализовать идею парящего купола, символизирующего Царствие Божие. В 1907 г. храм был вчерне готов, началась внутренняя отделка. Стоимость строительства собора составила 1876 тыс. рублей. Освящение собора состоялось в ознаменование 300-летия Дома Романовых 10 (23) июня 1913 г. в Высочайшем присутствии. Собор задумывался как памятник всем чинам Российского императорского флота, база которого в Кронштадте создана Петром I. Службы проводились до 1927 г. После закрытия собор был разграблен и переоборудован в кинотеатр имени Максима Горького, вследствие этого здание храма прозвали «Максимкой». В 1974 г. в соборе открылся филиал Центрального военно-морского музея. Здание вернули церкви в 2002 г. Работа по восстановлению собора началась осенью 2008 г. В мае 2013 г. патриарх Московский и Всея Руси Кирилл совершил чин великого освящения.

Верхний ряд – Морской Никольский собор. Нижний ряд: слева – парящий купол собора, в центре – иконостас, справа – мраморные доски с именами военных моряков, погибших на службе «За Веру, Царя и Отечество».

Фотографии М.В. Супотницкого

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук



Журнал издается
с 2017 года

ВЕСТНИК ВОЙСК РХБ ЗАЩИТЫ

ISSN 2587-5728

(Print)

ISSN 3034-2791

(Online)

Том 9, № 3

2025 г.

Рецензируемый научно-практический журнал, специализирующийся на освещении химических и биологических угроз Российской Федерации, научных достижений по основным направлениям деятельности и задачам войск РХБ защиты ВС РФ, повышении профессионального уровня специалистов войск РХБ защиты ВС РФ, возрождению интереса к их истории и привлечению молодых ученых к работе в научно-исследовательских организациях войск РХБ защиты ВС РФ. «Вестник войск РХБ защиты» – единственный журнал в Российской Федерации, который рассматривает научные проблемы соблюдения конвенций о запрещении химического и биологического оружия, а также историю применения химического и биологического оружия в войнах и конфликтах.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского»
Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ)

Выходит ежеквартально

Главный редактор

Петров Станислав Вениаминович.

Доктор технических наук. Главный научный сотрудник 27 НЦ МО РФ.
Москва, Россия

Заместители главного редактора

Супотницкий Михаил Васильевич

Кандидат биологических наук. Старший научный сотрудник. Главный специалист 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Колесников Дмитрий Петрович

Кандидат технических наук, доцент. Старший научный сотрудник 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Научный редактор

Лебединская Елена Владимировна

Кандидат биологических наук. Научный редактор отдела 27 НЦ МО РФ.
Москва, Россия

Редактор перевода

Сафонова Анна Олеговна

Редактор, дизайн, верстка

Щачнева Наталья Владимировна

Научный сотрудник отдела 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

К публикации принимаются статьи, подготовленные на русском и английском языках, в соответствии с правилами для авторов, размещенными на сайте журнала

<https://www.nbsprot.ru/jour/about/submissions#authorGuidelines>

Преимуществом в опубликовании пользуются работы по научным специальностям:

6.2.1. Вооружение и военная техника (технические науки).

6.2.10. Поражающее действие специальных видов оружия, средства и способы защиты (химические науки, технические науки, биологические науки).

6.3.3. Военная история (исторические науки).

Рецензируемый журнал открытого доступа, индексируется в базах данных: Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), ядро РИНЦ, Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstract Service (CAS), Российская государственная библиотека, DOAJ, ROAD, Академия Google (Google Scholar), Mendeley, Dimensions, Open Archives Initiative, ResearchBib, Lens.org, Ulrichsweb, Unpaywall, OpenCitations, Semantic Scholar, Wikidata и др.

Условия оферты для авторов приведены в п. 12 Правил для авторов (<https://www.nbsprot.ru/jour/about/submissions#authorGuidelines>).

Используется модель двойного слепого рецензирования. Плата за публикацию статьи и рецензирование рукописей не взимается.

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution

International 4.0 (CC BY 4.0).

Журнал распространяется в органах законодательной и исполнительной власти Российской Федерации, в центральных органах военного управления, в научно-исследовательских организациях и образовательных учреждениях Министерства обороны Российской Федерации.

Позиция редакции может не совпадать с точкой зрения авторов.

Редакционная коллегия

Агеев Николай Валентинович

Доктор исторических наук, профессор. Преподаватель кафедры истории войн и военного искусства Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия

Аминин Дмитрий Львович

Доктор биологических наук, член-кор. РАН. Начальник лаборатории биоиспытаний и механизма действия биологически активных веществ Тихоокеанского института биоорганической химии ДВО РАН. Владивосток, Россия

Бей Евгений Васильевич

Доктор исторических наук. Заместитель начальника отдела Научно-исследовательского института (военной истории) Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия

Григорьев Андрей Михайлович

Доктор химических наук. Старший научный сотрудник отдела 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Дармов Илья Владимирович

Доктор медицинских наук, профессор. Главный научный сотрудник научно-исследовательского управления филиала ФГБУ «48 ЦНИИ» МО РФ. Киров, Россия

Ефременко Елена Николаевна

Доктор биологических наук, профессор. Заведующая лабораторией кафедры химической энзимологии химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия

Завьялова Наталья Васильевна

Доктор биологических наук, профессор. Главный научный сотрудник управления 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Кондратьев Владимир Борисович

Доктор технических наук, профессор. Генеральный директор ГНИИ органической химии и технологии. Москва, Россия

Лакота Ян Янович

Доктор медицинских наук. Кандидат медицинских наук (онкология). Сотрудник Центра экспериментальной медицины Словацкой академии наук. Братислава, Словакия

Лещенко Андрей Анатольевич.

Доктор технических наук, профессор. Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела филиала ФГБУ «48 ЦНИИ» МО РФ. Киров, Россия

Монаков Михаил Сергеевич

Доктор исторических наук. Старший научный сотрудник отдела Научно-исследовательского института (военной истории) Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. Москва, Россия

Нечипуренко Юрий Дмитриевич

Доктор физико-математических наук. Ведущий научный сотрудник лаборатории ДНК-белковых взаимодействий Института молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН. Москва, Россия

Родин Игорь Александрович

Доктор химических наук. Заместитель декана по научно-инновационной работе химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия

Рыбальченко Игорь Владимирович

Доктор химических наук, профессор. Ведущий научный сотрудник отдела 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Холстов Виктор Иванович

Доктор химических наук, профессор. Руководитель Центра аналитических исследований Российской Федерации по конвенциям о запрещении химического и биологического оружия при Минпромторге России. Москва, Россия

Чугунов Евгений Анатольевич

Кандидат исторических наук. Доцент Военной академии РХБ защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко МО РФ. Кострома, Россия

Редакционный совет

Ртищев Алексей Викторович (председатель)

Начальник войск РХБ защиты ВС РФ. Москва, Россия

Ковтун Виктор Александрович (заместитель председателя)

Кандидат химических наук, доцент. Начальник 27 НЦ МО РФ. Москва, Россия

Иноземцев Валерий Александрович

Доктор военных наук. Начальник ФГБУ «33 ЦНИИИ» МО РФ. Вольск, Россия

Туманов Александр Сергеевич

Кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник. Начальник филиала ФГБУ «48 ЦНИИ» МО РФ. Киров, Россия

Шабельников Максим Петрович

Кандидат технических наук. Заместитель начальника 27 НЦ МО РФ по НИР. Москва, Россия

Тема номера: Вооружения и средства войск РХБ защиты

Биологическая безопасность и защита от биологических угроз

Противоэпидемические мероприятия на военной базе НАТО в Афганистане,
развернутые в ходе вспышки COVID-19
Д.И. Павельев, Т.Е. Сизикова, Н.А. Сайфулина, О.А. Ганина, Н.В. Карулина,
В.Н. Лебедев, С.В. Борисевич 205

Усиление функций вирусных патогенов – как это делается за рубежом в рамках
технологий синтетической биологии
М.В. Супотницкий, Н.В. Шачнева. 214

Вооружения и средства войск РХБ защиты

Параметры маскировки объектов аэрозолями и способ их установления
А.А. Брусенин, В.Н. Пенязь, Д.Н. Буряк, И.В. Артамонов, Д.С. Горбачев. 228

Методы и средства исследования микрофизических характеристик дисперсной фазы
аэрозольных образований для снижения заметности
В.Д. Иванов, В.П. Хантов, Р.С. Лошманов 240

Компьютерное моделирование распространения в атмосфере антропогенных загрязнений
А.М. Флеер, А.С. Сипаков, Ю.И. Хрипков 263

Исторический архив

Опыт применения частей и подразделений фугасных огнеметов в годы
Великой Отечественной войны 1941–1945 годов
В.В. Попов, А.М. Смирнов, В.В. Солнцев, В.А. Лагашкин, С.В. Колосович 279

Адрес редакции:

27 НЦ МО РФ, 111024, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.
Тел.: 8 (495) 693-44-48, e-mail: 27nc_1@mail.ru

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-69472 от 25.04.2017 г.
Все права защищены. При перепечатке материалов и размещении их на интернет-ресурсах ссылка на журнал обязательна.

Подписано в печать: 27.09.2025 г. Дата выхода в свет 30.09.2025 г. Тираж 400 экз. Цена свободная.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» — 33015

Отпечатано в типографии:
ФГУП «ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева», 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16 А. Тел.: 8 (499) 661-80-46, e-mail: ntrved@cniihm.ru

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications that the State Commission for Academic Degrees and Titles recommends for publishing the main scientific results of theses for Candidate of Science and Doctor of Science degrees



JOURNAL

OF NBC PROTECTION CORPS

[Vestnik voysk RChB zashchity]

ISSN 2587-5728
(Print)
ISSN 3034-2791
(Online)
Vol. 9 No 3
2025

Published since
2017

"Journal of NBC Protection Corps" is a peer-reviewed scientific and practical journal, publishing papers in the fields of chemical and biological threats to the Russian Federation. It covers scientific achievements in the main spheres and tasks of the NBC Protection Troops. The objective of the journal is to improve the professional level of specialists of the NBC Protection Troops, to revive the interest in their history and to attract young scientists to the work in scientific research organization of the NBC Protection Troops. "Journal of NBC Protection Corps" is the only journal in the Russian Federation that examines the scientific problems of compliance with the conventions on the prohibition of chemical and biological weapons, as well as the history of the use of chemical and biological weapons in wars and conflicts.

Founder and Publisher

27 Scientific Centre Named After Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF).

Quarterly Edition

Editor-in-Chief

Stanislav V. Petrov

Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher of the 27 SC MD RF.
Moscow, Russia

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail V. Supotnitskiy

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher. Chief Specialist of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Dmitry P. Kolesnikov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the 27 SC MD RF.
Moscow, Russia

Science Editor

Elena V. Lebedinskaya

Translation Editor

Anna O. Safonova

Editor, CRC preparation:

Natalia V. Shachneva

Researcher at the Department of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Articles in Russian and English are accepted for publication, prepared in accordance with the rules for authors posted on the journal's website

<https://www.nbsprot.ru/jour/about/submissions#authorGuidelines>

Papers in scientific specialties

6.2.1. Armament and military equipment (technical sciences).

6.2.10. The destructive effect of special types of weapons, means and methods of protection (chemical sciences, technical sciences, biological sciences).

6.3.3. Military history (historical sciences).

The peer-reviewed open access journal is indexed in the following databases:

Russian Index of Science Citation (RISC), RISC'Core, Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstract Service (CAS), Russian State Library, DOAJ, ROAD, Google Scholar (Google Scholar), Mendeley, Dimensions, Open Archives Initiative, ResearchBib, Lens.org, Ulrichsweb, Unpaywall, OpenCitations, Semantic Scholar, Wikidata, etc.

The terms of the offer for authors are given in §12 of the Rules for Authors (<https://www.nbsprot.ru/jour/about/submissions#authorGuidelines>). A double-blind review model is used. There is no fee for publishing an article or reviewing a manuscript. The content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International license (CC BY 4.0).

The journal is distributed among the bodies of legislative and executive power of the Russian Federation, in the main military headquarters, scientific and research institutions and educational establishments of the Ministry of Defence of the Russian Federation, in engineering, experimental design offices and industrial and manufacturing structures, working in the sphere of NBC Defence.

The information and views set out in this publication are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the Editorial Board.

Editorial Board

Nikolay V. Ageyev

Doctor of Historical Sciences, Professor. Lecturer of the Subdepartment of History of Wars and Military Art of the Military Academy of the RF Armed Forces' General Staff. Moscow, Russia

Dmitry L. Aminin

Doctor of Biological Sciences. Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Head of the Laboratory of Biotesting and the Mechanism of Action of Biologically Active Substances. Institute of Bioorganic Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Vladivostok, Russia

Yevgeny V. Bey

Doctor of Historical Sciences, Deputy Head of the Department at the Military History Research Institute of the Military Academy of the RF Armed Forces' General Staff. Moscow, Russia

Andrej M. Grigoryev

Doctor of Chemical Sciences. Senior Researcher of the Department of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Ilya V. Darmov

Doctor of Medical Sciences. Professor. Chief Research Associate of the Research Department. Branch Office of the 48 Central Scientific Research Institute (Kirov), MD RF. Kirov, Russia

Elena N. Efremenko

Doctor of Biological Sciences, Professor. Head of the Laboratory, Department of Chemical Enzymology, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia

Natalia V. Zavyalova

Doctor of Biological Sciences. Professor. Chief Researcher of the Department of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Vladimir B. Kondratiev

Doctor of Technical Sciences. Professor. General Director of the State Research Institute of Organic Chemistry and Technology. Moscow, Russia

Lakota Ján

MUDr., (MD), CSc. (PhD). Senior Lecturer, Fellow at the Center of experimental medicine SAS. Bratislava, Slovakia

Andrey A. Leshchenko

Doctor of Technical Sciences, Professor. Leading Researcher of the Scientific and Research Department. Branch Office of the 48 Central Scientific Research Institute (Kirov), MD RF. Kirov, Russia

Mikhail S. Monakov

Doctor of Historical Sciences, Senior Researcher of the Department at the Military History Research Institute of the Military Academy of the RF Armed Forces' General Staff. Moscow, Russia

Yuri D. Nechipurenko

Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Chief Researcher, Laboratory of DNA-Protein Interactions, Engelhardt Institute of Molecular Biology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Igor A. Rodin

Doctor of Chemical Sciences. Deputy Dean of the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia

Igor V. Rybalchenko

Doctor of Chemical Sciences. Professor. Leading Researcher of the Department of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Viktor I. Kholstov

Doctor of Chemical Sciences. Professor. Head of the Russian Center for Analytical Research on Conventions on the Prohibition of Chemical and Biological Weapons under the Ministry of Industry and Trade of Russia. Moscow, Russia

Yevgeniy A. Chugunov

Candidate of Historical Sciences. Associate Professor. NBC Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), MD RF, Kostroma, Russia

Editorial Council

Alexey V. Rtishchev (Chairman)

Chief of Nuclear, Chemical and Biological Protection Troops of Armed Forces of Russian Federation. Moscow, Russia

Viktor A. Kovtun (Deputy chairman)

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor. Head of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Valery A. Inozemtsev

Doctor of Military Sciences. Head of the 33 Central Scientific Research Test Institute, MD RF. Volsk, Russia

Alexander S. Tumanov

Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher. Head of the Branch Office of the 48 Central Scientific Research Institute (Kirov), MD RF. Kirov, Russia

Maxim P. Shabelnikov

Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of the 27 SC MD RF. Moscow, Russia

Theme of the Issue: Weapons and Means of NBC Protection Troops

Biological Security and Protection Against Biological Threats

Epidemic control measures at NATO military base in Afghanistan during COVID-19 outbreak D.I. Pavelyev, T.E. Sizikova, N.A. Saifulina, O.A. Ganina, N.V. Karulina, V.N. Lebedev, S.V. Borisevich	205
Enhancing viral pathogen functions – how it's done within synthetic biology technologies abroad M.V. Supotnitskiy, N.V. Shachneva.	214

Weapons and Means of NBC Protection Troop

Parameters for masking objects with aerosols and the method of their establishment A.A. Brusenin, V.N. Penjaz', D.N. Buryak, I.V. Artamonov, D.S. Gorbachev	228
Methods and tools of researching some microphysical features of disperse phase of reducing visibility aerosols V.D. Ivanov, V.P. Khantov, R.S. Loshmanov	240
Computer simulation of the spread of anthropogenic pollutants in the atmosphere A.M. Fleer, A.S. Sipakov, Yu.I. Khripkov.	263

Historical Archive

The experience of employing units and subunits of explosive flamethrowers during the Great Patriotic War of 1941–1945 V.V. Popov, A.M. Smirnov, V.V. Solntsev, V.A. Lagashkin, S.V. Kolosovich	279
--	-----

Address of the Editorial Office:

Federal State Budgetary Establishment
27 Scientific Centre Named After Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow, 111024, Russian Federation.
Tel.: 8 (495) 693-44-48, e-mail: 27nc_1@mil.ru

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications.
Certification of the Mass Media
ПИ № ФС 77-69472, April 25, 2017.

All rights reserved. Links to the journal are obligatory while citing.

Passed for printing: 27 September 2025.
Date of publication: 30 September 2025.

Print run: 400 copies. Free price

Subscription codes Pressa Rossii catalogue: 33015

Published in: Federal State Unitary Establishment «TsNIIKhM» named after D.I. Mendeleev»
Nagatinskaya Str. 16A, Moscow 115487, Russian Federation
Tel.: 8 (499) 661-80-46, e-mail: ntrved@cniihm.ru



Противоэпидемические мероприятия на военной базе НАТО в Афганистане, развернутые в ходе вспышки COVID-19

Д.И. Павельев, Т.Е. Сизикова, Н.А. Сайфулина, О.А. Ганина, Н.В. Карулина, В.Н. Лебедев, С.В. Борисевич✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«48 Центральный научно-исследовательский институт»
Министерства обороны Российской Федерации,
141306, Российская Федерация, Московская область, Сергиев Посад-6, ул. Октябрьская, д. 11
✉ e-mail: 48cnii@mail.ru

Основные моменты

Опыт, накопленный американскими эпидемиологами на начальной стадии эпидемии COVID-19 на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая в Афганистане, может быть использован при ликвидации вспышек ранее неизвестных контагиозных инфекций, вызванных применением биологического оружия.

Актуальность. Вспышки контагиозных инфекционных болезней в местах дислокации воинских контингентов могут препятствовать их функционированию. Особую опасность создают ранее неизвестные или вновь появившиеся контагиозные инфекционные болезни, для которых еще не успели создать эффективные средства диагностики, лечения и профилактики.

Цель исследования – анализ проводимых противоэпидемических мероприятий на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая в Афганистане (на примере вспышки COVID-19).

Источниковая база исследования. Англоязычные научные издания, размещенные в сети Интернет, за период с 2020 по 2021 г.

Метод. Аналитический.

Результаты. Крупные международные аэропорты являются одними из основных факторов быстрого распространения возбудителей контагиозных болезней в ближайшие и отдаленные регионы стран. Для снижения воздействия и распространения COVID-19 среди личного состава американским командованием на военной базе в аэропорту имени Хамида Карзая были введены карантинные мероприятия. При сравнении показателей, характеризующих распространение заболевания, установлено, что сравниваемые две группы (группа, находившаяся на карантине, и персонал вне карантина) были весьма близкими по значению показателя «Количество выявленных вирусоносителей», что свидетельствует о том, что только ограничительные меры недостаточны для предотвращения распространения COVID-19.

Выводы. Противоэпидемические мероприятия, проводимые на военных базах и в их структурных подразделениях, снижают распространение контагиозной инфекции только при отслеживании контактов заболевших. Распространение COVID-19 чаще всего происходит на рабочем месте военнослужащего.

Ключевые слова: COVID-19; вирус SARS-CoV-2; диагностика; изоляция; карантин; полимеразная цепная реакция; противоэпидемические мероприятия

Для цитирования: Павельев Д.И., Сизикова Т.Е., Сайфулина Н.А., Ганина О.А., Карулина Н.В., Лебедев В.Н., Борисевич С.В. Противоэпидемические мероприятия на военной базе НАТО в Афганистане, развернутые в ходе вспышки COVID-19. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):205–213. EDN:yknbto.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-205-213>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации.

Поступила 17.10.2024. После доработки 03.06.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Epidemic control measures at NATO military base in Afghanistan during COVID-19 outbreak

Dmitriy I. Pavelyev, Tatiana E. Sizikova, Natalia A. Saifulina, Olga A. Ganina, Natalia V. Karulina, Vitaliy N. Lebedev, Sergey V. Borisevich ✉

48 Central Scientific Research Institute
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Oktyabrskaya Street, 11, Sergiev Posad 141306, Russian Federation
✉ e-mail: 48cnii_1@mil.ru

Highlights

The experience of American epidemiologists gained from the COVID-19 outbreak at NATO military base at Hamid Karzai international airport in Afghanistan can be quite useful. It can help to stop outbreaks of new unknown contagious diseases provoked by biological weapons.

Relevance. The contagious disease outbreaks at military forces location may tamper with their work. The newly appeared or unknown contagious diseases are the most dangerous ones in this sense, as their efficient detection, treatment and prevention tools have not been created yet.

Purpose of the study is to analyze epidemic control measures that were taken at NATO military base at Hamid Karzai international airport (as exemplified by the COVID-19 outbreak).

Study base sources. The authors have studied scientific journals in the English language available on the Internet (publication 2020–2021).

Method. Analytical.

Results. Large international airports are one of the main sources of contagious disease agents spreading to the nearest and farthest regions and countries. The American commanders took some quarantine measures at NATO military base at Hamid Karzai international airport to diminish the spreading of COVID-19 among the troops and reduce possible consequences. The comparison of values of the two group (quarantine and non-quarantine) detected that these groups were quite close in terms of parameter “Number of detected virus carriers (percentage)”. It means that these limitations are not enough to prevent COVID-19 from spreading.

Conclusions. The epidemic control measures taken at military bases and their subdivisions help to decrease contagious disease spreading, only if the contacts of the ill persons are traced. The military persons mostly fall ill with COVID-19 at their job sites.

Key words: COVID-19; detection; epidemic control measures; isolation; polymerase chain reaction; quarantine; SARS-CoV-2 virus

For citation: Pavelyev D.I., Sizikova T.E., Saifulina N.A., Ganina O.A., Karulina N.V., Lebedev V.N., Borisevich S.V. Epidemic control measures at NATO military base in Afghanistan during COVID-19 outbreak. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):205–213. EDN:yknbt0.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-205-213>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 48 Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Received October 17, 2024. Revised June 3, 2025. Accepted September 27, 2025.

Пандемия COVID-19 смоделировала ситуацию появления неизвестной высококонтагиозной инфекционной болезни, к противодействию которой система здравоохранения не была готова. Это не последняя такая ситуация и ее причиной могут быть как неизвестные, скрывающиеся в природных резервуарах опасные патогены, так и применение неизвестным противником биологического оружия (БО). В этом аспекте изучение и обобщение опыта ранних противоэпидемических мероприятий при появлении COVID-19, представляется нам весьма актуальным, особенно если учитывать, что передача возбудителя болезни от больного человека к здоровому происходила воздушно-капельным путем при контактах незадолго до или после появления симптомов заболевания [1]. В ряде случаев наблюдался феномен «суперраспространения», когда один больной был источником заражения сотен людей [2–8].

Значительный интерес представляют меры предотвращения распространения инфекции в воинских контингентах. На распространение COVID-19 в воинских контингентах существенное влияние оказывают следующие факторы [9]:

- преобладающая доля мужчин в возрасте от 20 до 45 лет, у которых заболевание может вызывать лишь минимальные симптомы;
- особенность коллективной жизни в условиях военной службы (сон в общих казармах, общие столовые и туалеты, ограниченное рабочее пространство);
- невозможность (в отличие от других учреждений, для которых характерны общественные места проживания – университеты, школы-интернаты, лагеря и др.) закрытия на период начала вспышки.

Перечисленные факторы определяют постоянно существующую угрозу распространения COVID-19 в воинских контингентах. Вспышка COVID-19 на американском авианосце «Теодор Рузвельт» в марте 2020 г. продемонстрировала уязвимость к контагиозным болезням воинских контингентов с высоким уровнем контактов [10].

Цель работы – анализ проводимых противоэпидемических мероприятий на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая в Афганистане (на примере вспышки COVID-19).

Источниковая база исследования. Англоязычные научные издания, размещенные в сети Интернет, за период с 2020 по 2021 г.

Метод. Аналитический.

Задачи исследования. Оценка спектра проводимых противоэпидемических мероприятий и их влияния на распространение заболевания.

Военная база НАТО находилась в международном аэропорту имени Хамида Карзая. До ухода США из Афганистана в 2021 г. она была одной из крупнейших баз НАТО в регионе. Вспышка COVID-19 на базе произошла несмотря на то, что к ней готовились и проводили мероприятия противоэпидемической защиты [9]. Учитывая стратегическое расположение базы и необходимость ее постоянного функционирования, ее полное закрытие во избежание распространения COVID-19 признано невозможным. Таким образом, риск попадания вируса и распространения среди персонала базы был постоянным.

Общая численность военного и гражданского персонала базы на апрель 2020 г. составляла 4 тыс. человек из 58 разных стран, в том числе и местных граждан Афганистана. Примерно 50 % были военнослужащими, остальные – гражданскими сотрудниками министерства обороны. База занимала территорию площадью 0,5 км² [9]. Персонал, работающий на базе, в основном проживал в общих комнатах с общим санузлом, столовой и местами отдыха.

С 2012 г. на базе функционировало медицинское учреждение, основной задачей которого являлось оказание неотложной медицинской помощи. При необходимости осуществлялся перевод больных в учреждение, где им могла бы быть оказана специализированная медицинская помощь. Лабораторная база медицинского учреждения позволяла проводить различные иммунохимические и молекулярно-биологические методы для выявления вируса SARS-CoV-2 и диагностики COVID-19. В апреле 2020 г. количество ПЦР-тестов было еще значительно ограничено [9].

Диагноз COVID-19 ставили на основании обнаружения РНК вируса SARS-CoV-2 в мазках, взятых из носоглотки/орофарингеала, с использованием полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ). После выявления положительных случаев

проводили отслеживание контактов с целью определения бессимптомных носителей [11]. Бессимптомных носителей устанавливали также с помощью иммунохимических методов, в ходе которых выявляли IgM- и IgG-антитела к вирусу SARS-CoV-2 с последующим подтверждением результатов при использовании ПЦР-тестирования. При этом лица, у которых были выявлены антитела к вирусу SARS-CoV-2 при получении двух последовательных отрицательных результатов ПЦР-тестов считались выздоровевшими и могли быть выпущены из карантина. Для скрининга групп населения с низким риском заражения проводили анализ объединенных проб (пулирование). Объединяли пробы, полученные от пяти человек, и анализировали с помощью ПЦР-РВ. При получении положительного результата в определенном пуле проводили анализ индивидуальных проб, входящих в этот пул [9].

Возможность возникновения вспышки COVID-19 на военных базах НАТО, в том числе и на базе в международном аэропорту Хамида Карзая стала рассматриваться военными медиками уже в феврале 2020 г. после того, как стало очевидно, что распространение COVID-19 приобрело пандемический характер. Для снижения воздействия и распространения COVID-19 на военной базе был разработан медицинской службой план проведения карантинных мероприятий.

Карантин определялся как ограничение свободы передвижения человека после выявленного контакта с другим человеком, который потенциально мог быть инфицирован [12]. В карантин помещали всех лиц, прибывавших на военную базу из-за границы, а также всех контактировавших с заболевшими. Персонал, находящийся на карантине, был обязан соблюдать социальную дистанцию. Контактировавшим считался любой человек, который находился в пределах 2 м от инфицированного человека (начиная с 2 суток до появления симптомов и до момента изоляции пациента) в течение как минимум 15 минут [13].

Продолжительность карантина для COVID-19, в соответствии с рекомендациями CDC составляла не менее 14 суток. Считалось, что этот срок достаточен для того, чтобы у инфицированного вирусом SARS-CoV-2 человека появились симптомы COVID-19, или был получен положительный результат анализа проб на наличие РНК вируса SARS-CoV-2 [14]. Изоляция означала исключение человека из общей популяции в случае положительных результатов анализа на SARS-CoV-2, либо в случае появления

симптомов инфекции COVID-19. Критерием освобождения из изоляции являются отрицательные результаты анализа [9]. Все близко контактировавшие были помещены на карантин на 14 суток, с проведением иммунохимического или ПЦР-анализа на 5–7 сутки и еще раз перед выходом из карантина на 14-е сутки [9].

Карантинные помещения были разделены на «чистую» и «загрязненную» зоны. В «загрязненной» зоне, где необходимо было носить СИЗ, была оборудована внешняя зона досмотра, чтобы пациенты с COVID не попадали в «чистую» зону [9].

Для раннего выявления заболевания, предотвращения и распространения инфекции, а также снижения общей передачи инфекции на базе, всем сотрудникам было рекомендовано сообщать о возникновении симптомов заболевания (лихорадка, озноб, кашель, одышка или затрудненное дыхание, усталость, мышечная и головная боль, потеря вкуса или обоняния, боль в горле, заложенность носа или насморк, тошнота, рвота, диарея) для изоляции и тестирования.

С 7 марта 2020 г. весь персонал, прибывший на базу, проходил 14-суточный карантин. Из-за отсутствия на базе жилых помещений с индивидуальными санузлами помещенные на карантин лица были распределены по когортам по времени прибытия. Данные группы не смешивались с новыми лицами, помещенными в карантин. После выявления в карантинной когорте случая заболевания или вирусоносительства карантин продляли на 14 сут. Поэтому некоторые прибывшие на базу оставались на карантине в течение 44 сут (с 22 марта по 4 мая 2020 г.) [9]. Схема противоэпидемических мероприятий на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая представлена на рисунке 1.

В начале карантина проводили ПЦР-тестирование носоглоточных смывов (для выявления бессимптомных носителей инфекции, потенциальных источников трансмиссии вируса. Во время карантина (особенно во время пребывания без масок (прием пищи, гигиенические процедуры, сон) осуществлялось социальное дистанцирование. При проведении лабораторной диагностики использовали ОТ-ПЦР для выявления РНК вируса SARS-CoV-2 и иммунохимические методы для выявления антител IgM/IgG к возбудителю COVID-19. При выявлении положительного результата ПЦР-анализа или методом на выявление IgM-антител, равно как и при появлении симптомов заболевания, пациента немедленно переводили в отдельный

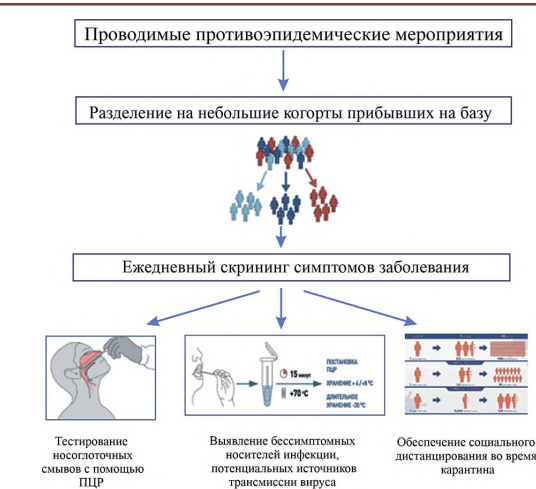


Рисунок 1 - Противоэпидемические мероприятия на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая (схема составлена авторами статьи)
Figure 1: Epidemic control measures at NATO military base at Hamid Karzai international airport (the layout is made by the authors of the article)

изолятор, минимальный срок карантина составлял 14 суток. Критерием для выхода из карантина являлись два отрицательных результата ПЦР с интервалом в 48 часов [9].

В течение марта все помещенные на карантин лица (35 человек) были размещены в палаточном городке, состоящем из четырех палаток Alaska Shelter, площадью 59,2 м² каждая.

Процесс прохождения карантина контролировала многопрофильная группа медицинских специалистов, созданная для отслеживания всех лиц, прибывающих на базу, регистрации всех возможных случаев COVID-19 и оказания логистической поддержки лицам, находящимся на карантине или больным. Развитие эпидемического процесса в начале вспышки COVID-19, представлено на рисунке 2.

Первый случай заболевания выявлен 5 апреля 2020 г. у 53-летнего мужчины, который перед этим находился на карантине в течение 12 сут. COVID-19 был подтвержден путем выявления РНК вируса SARS-CoV-2 в ОТ-ПЦР в реальном времени. Все проживающие совместно с ним в палатке прошли обследование, у трех из оставшихся 11 человек также был выявлен возбудитель COVID-19 и описаны симптомы заболевания, ведущим из которых был сухой кашель. Пациент был помещен в отделение интенсивной терапии [9]. 6 апреля 2020 г. в другой из палаток городка был выявлен подтвержденный в ОТ-ПЦР случай заболевания 59-летнего мужчины,



Рисунок 2 - Ход эпидемического процесса COVID-19 на военной базе НАТО в международном аэропорту имени Хамида Карзая (схема составлена авторами статьи)
Figure 2: COVID-19 epidemic spreading at NATO military base at Hamid Karzai international airport (the layout is made by the authors of the article)

также сопровождавшийся сухим кашлем. У одного из соседей по палатке, который имел длительный контакт с заболевшим (без маски), в ОТ-ПЦР также был получен положительный результат, при этом заболевание проходило бессимптомно. После этого все обитатели палаточного городка были направлены на повторный 14-суточный карантин. При выходе из карантина тестирование проводили независимо от результатов входного тестирования. Обследование с использованием иммунохимических методов, проведенное после завершения карантина, позволило выявить положительные результаты на антитела классов IgM и IgG к вирусу SARS-CoV-2. Углубленное ПЦР-исследование позволило выявить РНК вируса SARS-CoV-2 в мазках из носоглотки, взятых спустя 48 часов после помещения на повторный карантин [9].

При получении дополнительной информации о вышедших из карантина исходили из допущения, что если бы в наблюдаемой группе находился заболевший COVID-19 (повторно помещенный на карантин в общей сложности на 28–44 суток), то у него был бы достаточно выраженный иммунный ответ, который можно было выявить в серологических тестах в последний день карантина. Тестирование на антитела всех лиц после 14 суток позволяет минимизировать последствия возможных ложноотрицательных результатов ПЦР-анализа. Следовательно, отрицательные иммунохимические методы являются дополнительным критерием возможного выхода из карантина (основным критерием является результат ПЦР-анализа) [9]. При несоблюдении мер предосторожности

передача вируса от зараженного человека к здоровому, может произойти в любой день во время карантина. При выпуске из карантина без тестирования вирусоноситель может стать источником распространения заболевания [15, 16].

Продление карантина для тех, кто был определен как «тесно контактировавший с заболевшим», хотя и требует значительных логистических затрат, является лучшей защитной стратегией для предотвращения распространения заболевания, поскольку основным фактором, который способствует возникновению вспышки заболевания, является наличие в популяции бессимптомных носителей вируса SARS-CoV-2, не установленных в ходе до карантинного тестирования. Можно считать, что из 35 проходивших карантин, было не менее двух таких вирусоносителей. Поэтому даже при соблюдении социальной дистанции имела место внутрикарантинная передача вируса SARS-CoV-2 (как минимум, три новых случая заражения). Тем не менее, ретроспективно следует считать, что проведенные противоэпидемические мероприятия, включающие принятие и реализацию строгих карантинных процедур, позволили предотвратить крупномасштабную вспышку COVID-19 на военной базе НАТО в международном аэропорту Хамида Карзая в Афганистане в марте–мае 2020 г.

В последующем на базе была внедрена целенаправленная стратегия скрининга базовой популяции с целью исключения из на-

селения заразных бессимптомных пациентов с COVID-19. С 1 апреля по 12 сентября 2020 г. проведено 3466 ПЦР-анализов, выявлено 478 (14 %) положительных случаев. У 106 пациентов (22 %) были выявлены симптомы заболевания, 78 больных (74 %) были госпитализированы. При лечении 22 пациентов потребовалась искусственная вентиляция легких, проводимая в отделении интенсивной терапии [9]. Остальные положительные случаи выявления возбудителя COVID-19 были установлены в результате тестирования близких контактов.

Представляет интерес сравнение показателей, характеризующих распространение заболевания в группе прибывших из-за рубежа в начале вспышки COVID-19, находившихся на карантине и всего остального контингента базы (таблица 1).

Как следует из представленных в таблице 1 данных, сравниваемые группы являются весьма близкими по значению показателя «Количество выявленных вирусоносителей», что свидетельствует о том, что при наличии вирусоносителей в популяции только ограничительные меры недостаточны для предотвращения распространения заболевания.

База в международном аэропорту имени Хамида Карзая являлась важным элементом логистического хаба, осуществлявшего обеспечение группировки войск США в Афганистане, поэтому введение максимального уровня карантинных мероприятий,

Таблица 1 – Показатели, характеризующие распространение COVID-19 на военной базе НАТО имени Хамида Карзая в марте–сентябре 2020 г.

Table 1. Values that characterize COVID-19 spreading at NATO military base at Hamid Karzai international airport in March–September 2020

Показатель / Value	Группа, находившаяся в карантине / Quarantine group	Весь контингент базы / All base force
Численность группы, чел. / Group size, pl.	35	4000
Доля обследованных в ПЦР-тестах и серологических тестах, процент / The percentage of people who took PCR tests and serological tests	100	≈ 80
Количество выявленных вирусоносителей, доля (процент) / Number of detected virus carriers, share (percentage)	5 (14)	478 (12)
Количество лиц с симптомами заболевания, доля от числа вирусоносителей (процент) / Number of people who have disease symptoms percentage out of virus carriers, share (percentage)	2 (40)	106 (22)
Количество госпитализированных, доля от числа заболевших (процент) / Number of hospitalized persons percentage out of those who had fallen ill, share (percentage)	1 (50)	78 (74)
Примечание. Таблица адаптирована авторами из работы С. Medby с соавт. [9]. Note. The table is adapted by the authors from C. Medby et al. [9].		

очевидно, было неприемлемо. COVID-19, особенно в начале пандемии, характеризовался широким диапазоном тяжести заболевания (от бессимптомных форм до тяжелого проявления). В этой связи необходимым является прослеживание контактов выявленных вирусносителей. При этом необходимо учитывать, что при возникновении ранее неизвестного заболевания при полном отсутствии на первом этапе развития вспышки средств специфического лечения и профилактики, до начала коммерческого выпуска средств диагностики всегда будет отсутствие последних в необходимых объемах.

Выводы

Вспышки COVID-19 на военной базе могли иметь пагубные последствия для ее нормального функционирования. Основными противоэпидемическими мероприятиями (до создания эффективных средств профилактики) являются карантин, изоляция и отслеживания контактов заболевших.

В воинских контингентах, состоящих в основном из молодых и здоровых людей, у значительной части инфицированных вирусом

SARS-CoV-2 отсутствовали выраженные симптомы заболевания, поэтому необходим был скрининг популяции с целью выявления различных бессимптомных носителей возбудителя COVID-19.

COVID-19 чаще всего распространялся на рабочем месте. При соблюдении мер социального дистанцирования жилые помещения, столовые, магазины и т. д. характеризовались более низким риском распространения заболевания. Однако при этом даже в карантинных учреждениях затруднительно обеспечить социальное дистанцирование в полном объеме, о чем свидетельствуют зарегистрированные вспышки в условиях карантина [13].

При возникновении вспышки нового заболевания на первых этапах существует дефицит средств диагностики. В этой связи целесообразно использовать для выявления вирусносителей как молекулярно-биологические, так и иммунохимические методы. Для экономии средств диагностики возможно проведение анализа объединенных проб (особенно при анализе проб от лиц с низким риском заболевания).

Ограничения исследования / Limitations of the study

Данный аналитический обзор имеет ряд ограничений, а именно: 1) исследование основывается только на анализе открытых источников, включая источники литературы, опубликованные в англоязычных научных журналах и доступные в сети Интернет; 2) после ликвидации военной базы НАТО в Афганистане в 2021 г., дальнейшее изучение рассматриваемого вопроса в доступных источниках содержится в ограниченном объеме / This analytical review has a number of limitations, such as: (1) the study is based on the analysis of the open sources including papers, published in English scientific journals that are available on the Internet; (2) as the NATO military base in Afghanistan was dismantled in 2021, the further study of the topic in question is quite limited as the available data is scarce.

Список источников / References

1. Ge Y, Martinez L, Sun S, Chen Z, Handel A, Feng L, et al. COVID-19 Transmission Dynamics Among Close Contacts of Index Patients With COVID-19 *JAMA Intern Med.* 2021;181(10):1343. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2021.4686>
2. Althouse B, Wenger E, Miller J, Scarpino S, Allard A, Hu H, et al. Superspreading events in the transmission dynamics of SARS-CoV-2: Opportunities for interventions and control Hu. *PLoS Biol.* 2020;18(11):e3000897. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000897>
3. Salahshoori I, Mobaraki-Asl A, Seyfaee N, Faraji M, Ganjkhani M, Hamrang A, et al. Mirzaei Nasirabad. Overview of COVID-19 Disease: Virology, Epidemiology, Prevention Diagnosis, Treatment, and Vaccines. *Biologics.* 2021;1(1):2–40. <https://doi.org/10.3390/biologics1010002>
4. Meyerowitz E, Richterman A, Gandhi R, Sax P Transmission of SARS-CoV-2: A Review of Viral, Host, and Environmental Factors, P.E. Sax *Ann Intern Med.* 2021;174(1):69–79. <https://doi.org/10.7326/M20-5008>
5. Goldberg Y, Mandel M, Bar-On YM, Bodenheimer O, Freedman L, Ash N, Alroy-Preis S, Huppert A, Milo R, et al. Protection and waning of natural and hybrid COVID-19 immunity. *medRxiv.* 2021.12.04.21267114. <https://doi.org/10.1101/2021.12.04.21267114>
6. Lewis D. Mounting evidence suggests coronavirus is airborne—but health advice has not caught up. *Nature.* 2020;583(7817):510–3. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02058-1>

7. Tellier R, Li Y, Cowling B, Tang J. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis*. 2019;19(1):101.
<https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>
8. Bazant M, Bush J. Guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2021;118(17):e2018995118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2018995118>
9. Medby C, Larssen C, Norquay M, Killi H, Gurney J. Management of COVID-19 in a Deployed Setting. *Military Medicine*. 2023;188(3-4):e451–5.
<https://doi.org/10.1093/milmed/usab218>
10. Kasper M, Geibe J, Sears C, Luse T, Olson N, DeLong G, et al. An outbreak of COVID-19 on an aircraft carrier. *N Engl J Med*. 2020;383(25):2417–26.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa2019375>
11. Ghandi M, Yokoe D, Havlir D. Asymptomatic transmission, the Achilles' heel of COVID-19. Editorial published in *N Engl J Med*. 2020;382:2158–60.
<https://doi.org/10.1056/NEJMe2009758>
12. Ghanchi A. Adaptation of the national plan for the prevention and fight against pandemic influenza to the 2020 COVID-19 epidemic in France. *Disaster Med Public Health Prep*. 2020;14(6):805–7.
<https://doi.org/10.1017/dmp.2020.82>
13. Matos R, Chung K. DoD COVID-19 Practice Management Guide, Clinical Management of COVID-19, Operational Considerations for COVID-19: Planning and Preparation. Published online by the Department of Defense, March 4, 2020, P. 47.
14. Lauer S, Grantz K, Bi Q, Jones F, Zheng Q, Meredith H, et al. The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: estimation and application. *Ann Intern Med*. 2020;172(9):577–82.
<https://doi.org/10.7326/M20-0504>
15. Zhou F, Yu T, Du R, Fan G, Liu Y, Wang Y, et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2020;395(10229):1054–62.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30566-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30566-3)
16. Grasselli G, Zangrillo A, Antonelli M, Cabrini L, Castelli A, Zanella A, et al. Baseline characteristics and outcomes of 1,591 patients infected with SARS-CoV-2 admitted to ICUs of the Lombardy region, Italy. *JAMA*. 2020;323(16):1574–81.
<https://doi.org/10.1001/jama.2020.5394>

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **Д.И. Павельев** – анализ данных по распространению COVID-19 в начале пандемии, написание текста рукописи. **Т.Е. Сизикова** – анализ проведения диагностики заболевания во время вспышки COVID-19 на военной базе НАТО. **Н.А. Сайфулина** – анализ проведения серологических исследований во время вспышки COVID-19 на военной базе НАТО. **О.А. Ганина** – анализ возникновения вспышки на военной базе НАТО. **Н.А. Карулина** – анализ проводимых противоэпидемических мероприятий в ходе вспышки на военной базе НАТО. **В.Н. Лебедев** – анализ эффективности проводимых противоэпидемических мероприятий. **С.В. Борисевич** – обоснование концепции проводимого исследования, редактирование текста рукописи. / All authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions were as follows. **D.I. Pavelyev** has analyzed the data on COVID-19 spreading at the onset of the pandemic at NATO military base, has written the text of the article. **T.E. Sizikova** has analyzed the process of the disease detection during the COVID-19 outbreak at the NATO military base. **N.A. Saifulina** has analyzed the process of serological tests taking during the COVID-19 outbreak at the NATO military base. **O.A. Ganina** has analyzed the origin of the COVID-19 outbreak at the NATO military base. **N.A. Karulina** has analyzed the epidemic control measures that were taken during the COVID-19 outbreak at the NATO military base. **V.N. Lebedev** has analyzed the efficiency of taken epidemic control measures. **S.V. Borisevich** has formulated the concept of the study, has edited the text of the article.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах / Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации», 141306, Российская Федерация, г. Сергиев Посад-6, ул. Октябрьская, д. 11.

Павельев Дмитрий Игоревич. Заместитель начальника отдела.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3204-1897>

Сизикова Татьяна Евгеньевна. Старший научный сотрудник, канд. биол. наук.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1817-0126>

Сайфулина Наталья Александровна. Младший научный сотрудник.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9531-9216>

Ганина Ольга Александровна. Младший научный сотрудник.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1248-929X>

Карулина Наталья Васильевна. Старший научный сотрудник, канд. биол. наук.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7781-5249>

Лебедев Виталий Николаевич. Ведущий научный сотрудник, д-р биол. наук, проф.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-4599>

Борисевич Сергей Владимирович. Начальник ФГБУ «48ЦНИИ» Минобороны России, д-р биол. наук, проф., академик РАН.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6742-3919>

Контактная информация для всех авторов: 48 cnii@mil.ru

Контактное лицо: Борисевич Сергей Владимирович; 48 cnii@mil.ru

48 Central Scientific Research Institute of the Ministry of the Defence of the Russian Federation, Oktyabrskaya Str., 11, Sergiev Posad-6 141306, Moscow region, Russian Federation.

Dmitrii I. Paveliev. Deputy head of the department.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3204-1897>

Tatiana E. Sizikova. Leading researche. Cand. Sci. (Biol.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1817-0126>

Natalia A. Saifulina. Junior Researcher.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9531-9216>

Olga A. Ganina. Junior Researcher.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1248-929X>

Natalia V. Karulina. Leading researche. Cand. Sci. (Biol.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7781-5249>

Vitaliy N. Lebedev. Senior researcher. Dr. Sci. (Biol.), Professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6552-4599>

Sergey V. Borisevich. Head of Institute. Dr. Sci. (Biol.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6742-3919>

Contact information for all authors: 48 cnii@mil.ru

Contact person: Sergey V. Borisevich; 48 cnii@mil.ru



Усиление функций вирусных патогенов – как это делается за рубежом в рамках технологий синтетической биологии

М.В. Супотницкий✉, Н.В. Шачнева

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации,
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Основные моменты

- Современный уровень синтетической биологии позволяет создавать вирусы с дополнительными функциями (Gain-of-function, GOF), способные вызывать инфекционные процессы у людей, животных и растений.
- Инфекционный процесс, вызванный вирусом с GOF, может развиваться с нетипичными симптомами и поражениями внутренних органов, что затрудняет своевременную диагностику и снижает эффективность лечения.
- Конвенционных механизмов, блокирующих создание и распространение синтетических патогенов, не существует.
- Цифровизация синтетической биологии позволяет передавать патогены в любую точку мира в виде цифровых данных и воссоздавать их в условиях *in vitro*.

Актуальность. Технологии синтетической биологии, включая редактирование генома, доступны даже небольшим лабораториям и бесконтрольно используются для модификации вирусных патогенов, поражающих человека, животных и растения.

Цель исследования – показать, как за рубежом в рамках технологий синтетической биологии могут создаваться вирусы с GOF и их потенциальное поражающее действие.

Источниковая база исследования. Англоязычные публикации из базы PubMed.

Метод исследования. Аналитический. Применялись рекомендации PRISMA.

Результаты. Конструирование синтетических вирусов осуществляется преимущественно двумя методами: сборка по Гибсону (Gibson assembly); и рекомбинация, ассоциированная с трансформацией (Transformation-Associated Recombination, TAR), включая TAR-клонирование в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*. Вирусные геномы собираются из олигонуклеотидных фрагментов, в которые предварительно вносятся целевые модификации. Данный подход позволяет получать синтетические вирусы с GOF. В ходе исследования были идентифицированы молекулярные маркеры, позволяющие отличать синтетические вирусы от природных штаммов.

Заключение. Современные достижения синтетической биологии создают новую реальность – возможность ведения биологической войны, в которой будет невозможно распознать сам ее факт; тех, кто ее ведет; и какими поражающими средствами. Сложившаяся ситуация формирует принципиально новую парадигму биологических угроз в сферах медицины, ветеринарии и агрокультуры, что требует разработки международных механизмов управления возникающими рисками.

Ключевые слова: сборка по Гибсону; синтетические вирусы; синтетическая биология; TAR-клонирование; Gain-of-function

Для цитирования: Супотницкий М.В., Шачнева Н.В. Усиление функций вирусных патогенов – как это делается за рубежом в рамках технологий синтетической биологии. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):214–227. EDN:rjtfnx.

<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-214-227>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: М.В. Супотницкий является заместителем главного редактора журнала с 2017 г. Это не повлияло на процесс рецензирования и окончательное решение. Н.В. Шачнева является редактором журнала с 2024 г. Это не повлияло на процесс рецензирования и окончательное решение.

© М.В. Супотницкий, Н.В. Шачнева, 2025

Journal of NBC Protection Corps. 2025. V. 9. No 3

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 09.05.2025 г. После доработки 11.08.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Enhancing viral pathogen functions – how it's done within synthetic biology technologies abroad

Mikhail V. Supotnitskiy✉, Natalia V. Shachneva

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

- Modern synthetic biology technologies enable the creation of gain-of-function (GOF) viruses capable of causing infectious processes in humans, animals, and plants.
- GOF virus-induced infections may present with atypical symptoms and internal organ damage, complicating timely diagnosis and reducing treatment efficacy.
- There are no conventional mechanisms to prevent the creation and spread of synthetic pathogens.
- The digitization of synthetic biology allows pathogens to be transmitted as digital data and reassembled *in vitro*.

Relevance. Synthetic biology technologies, including genome editing and virus synthesis, are now accessible even to small laboratories and are actively used to modify pathogens affecting humans, animals, and plants.

Purpose of the study is to demonstrate how GOF viruses can be created abroad using synthetic biology technologies and assess their potential pathogenic effects.

Study base sources. English-language publications from the PubMed database.

Method. Analytical approach, following PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines.

Results. Currently, synthetic virus construction primarily employs two methods: Gibson assembly, Transformation-associated recombination (TAR), including TAR cloning in *Saccharomyces cerevisiae* yeast. Viral genomes are assembled from oligonucleotide fragments with targeted modifications, enabling the production of synthetic viruses with designed properties, including GOF traits. The study also identified molecular markers distinguishing synthetic viruses from natural strains.

Conclusion. Advances in synthetic biology have created a new reality – the potential for biological warfare where the fact of an attack, its perpetrators, and the means used may remain undetectable. This situation establishes a fundamentally new paradigm of biological threats to medicine, veterinary science, and agriculture, necessitating the development of international risk management mechanisms.

Key words: Gain-of-function; Gibson Assembly; synthetic biology; synthetic viruses; TAR cloning

For citation: Supotnitskiy M.V., Shachneva N.V. Enhancing viral pathogen functions – how it's done within synthetic biology technologies abroad. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):214–227. EDN:rjtfnx.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-214-227>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: Mikhail V. Supotnitskiy is deputy Editor-in-Chief of the journal (since 2017). This had no impact on the peer review process and the final decision. Natalia V. Shachneva is editor of the journal (since 2024). This had no impact on the peer review process and the final decision.

AI use: The authors have not resorted to.

Существующие подозрения об искусственном происхождении пандемии COVID-19 требуют понимания возможностей ученых в конструировании новых патогенных организмов. Особые опасения вызывают патогены с усиленными функциями (Gain-of-function, GOF), создаваемые в рамках технологий синтетической биологии.

Цель исследования – показать, как за рубежом в рамках технологий синтетической биологии могут создаваться вирусы с GOF и их потенциальное поражающее действие.

Источниковая база исследования. Англоязычные публикации из базы PubMed.

Метод исследования. Аналитический. Применялись рекомендации PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)¹.

Для достижения поставленной цели мы рассмотрели:

- терминологическую базу данных исследований;
- существующие подходы к конструированию геномов опасных вирусных патогенов на примерах восстановления вируса оспы лошадей и коронавирусов;
- применение технологии к вирусам сельскохозяйственных животных и растений;
- возможности идентификации вирусов, полученных методами синтетической биологии.

Но сначала определимся с терминами в их логической связи.

Логическая связь терминов. Термин *генная инженерия* относится к любому применению инструментов молекулярной биологии для изменения генетического кода организма, а *биотехнология* является отраслью его промышленного применения. Генная инженерия охватывает развивающиеся дисциплины *синтетической биологии*, использующей рациональный инженерный подход к созданию генетического материала (реструктуризация, перекодирование, минимизация геномов и др.). Среди них:

синтетическая геномика – предполагает создание вирусов, бактерий и эукариотических клеток на основе искусственных геномов, в ее рамках химически синтезируются целые хромосомы и геномы, и ими заменяют их естественные аналоги [1];

обратная генетика вирусов – частный случай синтетической биологии. Такое название произошло из-за того, что для получения способных к размножению РНК-вирусов ученые «идут» не от ДНК к РНК, как это обычно происходит в клетке при синтезе белка, а наоборот, от РНК вируса к комплементарной ей ДНК (кДНК), а с нее с помощью РНК-полимеразы фага Т7 «обратно» к инфекционной РНК. Синтезированная плюс-цепь РНК коронавирусного генома имитирует клеточную матричную РНК (мРНК) и эффективно распознается трансляционным аппаратом клетки-хозяина, что приводит к немедленному запуску продукции инфекционных вирусных частиц [1, 2];

синтетическая жизнь – биологическая система, созданная путем внедрения искусственно синтезированного генома в природную клетку-реципиент, где: полностью замененная хромосома осуществляет контроль над всеми клеточными процессами; фенотипические характеристики строго соответствуют заданным параметрам; сохраняется способность к неограниченной пролиферации с наследованием искусственного генома [3];

синтетическая клетка – минимальная жизнеспособная единица синтетической жизни, характеризующаяся: полной заменой природного генома синтетической ДНК; сохранением основных признаков жизни (метаболизм, репликация, адаптация); программируемыми функциональными свойствами; стабильным наследованием искусственного генетического материала в поколениях [3].

Все вышеупомянутые области исследований имеют пересекающиеся пространства и их разработки влияют друг на друга.

Усиление и утрата функции патогена – что это? Эксперименты, в результате которых появляются патогены с дополнительной функциональностью (увеличивают способность возбудителя вызывать заболевание путем повышения вирулентности, приобретения патогенности или трансмиссивности; устойчивые к антибактериальным и антивирусным лекарственным препаратам; способные преодолевать иммунитет, созданный доступными вакцинами, и др.), классифицируются как исследования по приобретению

¹ PRISMA. URL: <https://www.prisma-statement.org/> (дата обращения: 10.04.2025).

функции (Gain-of-function, GOF); а генетические изменения, приводящие к ослаблению патогенов (снижение способности патогена вызывать заболевание; повышение его чувствительности к лекарственным препаратам и т.п.), классифицируются как исследования по потере функции (loss-of-function, LOF)².

В исследованиях GOF и LOF используются одни и те же методы, оборудование и приемы.

Существующие подходы к конструированию геномов опасных патогенов. Синтезировать в условиях *in vitro* полный геном простейшего клеточного организма или вируса в настоящее время невозможно – нет технологий химического синтеза ДНК, позволяющих сборку цепочек нуклеотидов необходимой длины [4]. Современные ДНК-синтезаторы способны создавать цепочки ДНК в пределах 200–250 пар нуклеотидов (п.н.) При увеличении их длины выход продукта и точность синтеза падают [3]. Первый полностью синтезированный геном клеточного организма, *Mycoplasma genitalium*, содержит 583 тысяч п.н. (т.п.н.) [5], средний геном коронавируса 28–32 т.п.н. [6], геном ортопоксвирусов 140–280 т.п.н. [7]. Поэтому их собирают из фрагментов.

Наиболее распространенный способ синтеза длинных цепочек ДНК в условиях *in vitro* разработан Дэниелем Дж. Гибсоном. Он позволяет одновременно объединять до 15 фрагментов ДНК на основе идентичности последовательностей. Для этого необходимо, чтобы ДНК фрагменты перекрывались с соседними фрагментами ДНК примерно на 20–40 п.о. Экзонуклеаза обнажает 3'-концы линейной ДНК; затем фрагменты, имеющие перекрывающуюся терминальную гомологию, отжигаются и служат праймерами для ДНК-полимеразы, которая заполняет пробелы; наконец, ДНК-лигаза запечатывает разрезы. Образуются замкнутые кольцевые молекулы ДНК. Первый геном искусственной клетки собрали с использованием этого метода. Основные достоинства метода: универсальность в генетической модификации – позволяет проводить направленный мутагенез с высокой точностью, включая: вставки и делеции заданных последовательностей; точечные мутации – снипсы (SNPs) в специфических сайтах; удаление нестабильных или мешающих элементов (например, шпилек или повторов); эффективность сборки – одновременное соединение нескольких фрагментов ДНК за одну реакцию без необходимости поэтапных

лигирований; совместимость с другими методами – может использоваться в комбинации с CRISPR/Cas9 или TAR-клонированием для сложных генетических конструкций [5, 8].

Как и все методы синтеза длинных цепочек ДНК, работающие в условиях *in vitro*, сборка Гибсона ограничена количеством сшиваемых фрагментов в одной реакции, что требует поэтапной процедуры сборки все более крупных конструкций геномной ДНК [8].

В настоящее время для конструирования длинных фрагментов ДНК- и РНК-геномов вирусов предпочтение отдается способу рекомбинации, связанному с трансформацией (transformation-associated recombination, TAR; TAR-клонирование; TAR-клонинг) в пекарских дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*. Их способность эффективно и с высокой точностью сшивать вместе линейные молекулы ДНК, представляющие собой гомологичные участки длиной всего 40 п.н. на концах, вывело из тупика конструирование крупных геномов, опиравшихся на методы *in vitro*. Дрожжи *S. cerevisiae* естественным образом поддерживают геном размером 12 Мб, состоящий из 16 хромосом в диапазоне 230–1500 т.п.о. в его гаплоидной версии, и могут существовать как полиплоид. Они чрезвычайно устойчивы к изменениям в содержании и архитектуре генома. В рамках TAR-клонирования конструирование геномов патогенов проводится с использованием следующих инструментов [9–10]:

- искусственной хромосомы дрожжей (Yeast Artificial Chromosome, YAC) – это сконструированная векторная система, предназначенная для репликации подобно хромосоме и стабильного сохранения больших фрагментов ДНК в клетках дрожжей;

- бактериальной искусственной хромосомы (Bacterial Artificial Chromosome, BAC) – конструкция ДНК, используемая для клонирования больших последовательностей ДНК в бактериях, чаще всего в *Escherichia coli*. Технологии BAC основаны на природных плазмидах, таких как конъюгативные F-плазмиды (обычно 94,5 т.п.н.), эффективно имитирующие естественные хромосомные механизмы, и способные стабильно сохранять большие вставки ДНК;

- сочетанием обоих подходов (YAC-BAC).

На практике последовательность вирусного генома делят на несколько фрагментов для последующей гомологичной рекомби-

² Schuerger C, Batalis St, Quinn K, et al. Understanding the Global Gain-of-Function Research Landscape. Center for Security and Emerging Technology. 2023. August. URL: <https://github.com/georgetown-cset/gain-of-function-survey/tree/main> (дата обращения: 12.05.2025).

нации в *S. cerevisiae*. В стратегии на основе YAC перекрывающиеся фрагменты ДНК³ доставляются в дрожжи *S. cerevisiae* вместе с линейаризованным YAC/TAR-вектором. Гомологичная рекомбинация в дрожжевых клетках собирает фрагменты ДНК, формируя YAC-вектор и получается плазмида YAC, содержащая полноразмерную кДНК вируса. Плазмида YAC трансфицируется в чувствительные клетки, где и происходит сборка вирусной частицы. В стратегии на основе BAC для соединения полноразмерного вирусного генома с вектором BAC используются сайты рестрикции и другие методы. Затем вектор трансформируется в *E. coli* для амплификации, а очищенная двухрепликонная плазмида BAC трансфицируется в чувствительные клетки (рисунк 1).

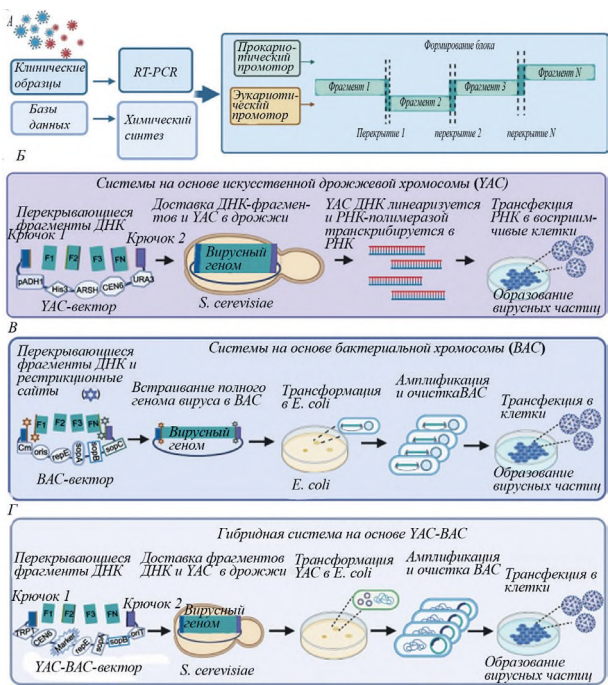


Рисунок 1 – Обзор стратегий и процессов, связанных с созданием инфекционных клонов вирусов с использованием YAC, BAC и комбинированных систем YAC-BAC. А – Амплификация генома вируса. Б – Системы на основе YAC. В – Системы на основе BAC. Г – Гибридные системы YAC-BAC (рисунок адаптирован авторами из работы Y. Wu со соавт. [2])

Figure 1: Overview of strategies and processes involved in the creation of infectious viral clones using YAC, BAC, and hybrid YAC-BAC systems (the figure is adapted by the authors from Y. Wu et al. [2])

³ Для генома РНК-вируса такие фрагменты получают обратной транскрипцией, т.е. сшиваются фрагменты кДНК.

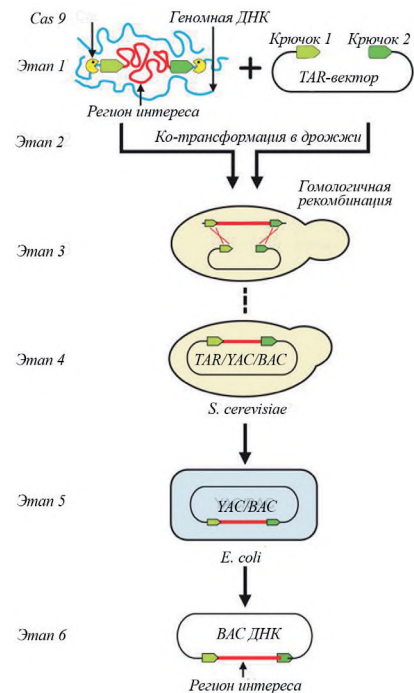


Рисунок 2 – Схема TAR-клонинга целевого гена или региона ДНК. Этап 1 – Подготовка вектора. Этап 2 – Котрансформация. Линейаризованный вектор + геномную ДНК вводят в дрожжи *S. cerevisiae*. Этапы 3 и 4 – Рекомбинация между таргетными последовательностями в векторе и соответствующими участками в фрагменте геномной ДНК. «Крючки» вектора находят гомологичные участки в геномной ДНК, происходит «сшивание» в кольцевую молекулу с нужным геном. Этап 5 – Перенос выделенных TAR-молекул, содержащих интересующий регион, из дрожжевых клеток в бактериальные с помощью электропорации. Этап 6 – Секвенирование или функциональный анализ (рисунок адаптирован авторами из работы N. Kouprina, V. Larionov [9])

Figure 2: Schematic of TAR cloning for target gene/DNA region isolation. Step 1, Vector preparation. Step 2, Co-transformation. Linearized vector + genomic DNA are introduced into *S. cerevisiae* yeast. Steps 3–4, Homologous recombination between vector targeting sequences and genomic DNA fragments. Vector “hooks” identify homologous regions, enabling circularization with the desired gene. Step 5, Transfer of isolated TAR molecules (containing target region) from yeast to bacterial cells via electroporation. Step 6, Sequencing or functional analysis (the figure is adapted by the authors from N. Kouprina, V. Larionov [9])

Специализированные «крючки» (hook 1 и hook 2) на концах вектора TAR представляют собой перекрывающиеся последовательности, которые обеспечивают точную вставку

целевого фрагмента. Совместная трансформация вектора и целевого фрагмента в дрожжах запускает гомологичную рекомбинацию, обусловленную врожденными способностями дрожжей к репарации ДНК, что приводит к бесшовной сшивке фрагментов, т.е. без лишних нуклеотидов в местах их интеграции. YAC позволяют сохранять и изучать более крупные фрагменты геномной ДНК в их естественном контексте (до 2000 т.п.о.); ВАС – менее емкая система (300 т.п.о.), но проще в обращении и модификации с помощью стандартных методов молекулярной биологии [2]. Последовательность TAR-клонинга генов показана на рисунке 2.

Работу этих стратегий и процессов рассмотрим ниже на конкретных примерах получения синтетических ДНК- и РНК-вирусов.

Конструирование синтетических ортопоксвирусов – вирус лошадиной оспы. Вирус лошадиной оспы (*Horsepox virus*, HPXV) изолирован от лошади в Монголии в 1976 г. – изолят MNR-76. Его геном составляет 212 т.п.о. Он содержит инвертированные терминальные повторы длиной 7,5 т.п.о. и не имеет обширных tandemных терминальных повторов. Филогенетический анализ консервативного региона показал тесную связь HSPV с секвенированными изолятами вируса осповакцины (VACV) и вируса оспы кроликов [12].

Работа по восстановлению HPXV проводилась с целью показать возможность создания вымершего ортопоксвируса по его неполной ДНК последовательности [13]⁴.

Технически эта задача имела сложное решение по следующим причинам: геном HPXV огромен даже для ортопоксвирусов, синтезировать его в условия *in vitro* в виде одной последовательности невозможно; нуклеотидная последовательность генома вируса не была определена полностью, шпилечные теломеры концевых его участков, определяющие инициацию репликации, регуляцию транскрипции генов и упаковку в вирионы, расшифрованы не были; поксвирусы не могут быть просто извлечены из трансфицированных клеток, поскольку их ДНК не является инфекционной.

Х.Д. Yao и D.H. Evans [14] ранее показали, что клетки, инфицированные вирусом фибромы Шопа (*Shope fibroma virus*, SFV –

вирус семейства *Poxviridae*), обеспечивают клеточную среду, способную собирать из рестрикционных фрагментов ДНК геном VACV. Этим воспользовались R.S. Noyce с соавт. [13] для восстановления вируса HPXV, способного к репликации в клетках и заражению животных. Их эксперимент выполнен следующим образом.

Дизайн генома синтетического химерного HPXV (synthetic chimeric HPXV, scHPXV) основан на опубликованной последовательности штамма HPXV MNR-76 (GenBank, регистрационный номер DQ792504). Его разделили на десять фрагментов с перекрывающимися последовательностями с каждым соседним фрагментом (не менее 1,0 т.п.н.), обеспечивающих достаточную гомологию для поддержки рекомбинации между совместно трансфицированными фрагментами. Концевые 40 п.н. из последовательности HPXV не были включены в синтетические фрагменты ITR. Шпилечные теломеры заменили двумя синтетическими шпилечными структурами на основе последовательностей штамма VACV WR. Все фрагменты ДНК HPXV были синтезированы компанией GeneArt и поставлены в виде плазмидных клонов в *E. coli*⁵. ДНК концевых шпилек VACV были приобретены у Integrated DNA Technologies в виде 157-нуклеотидных фрагментов ДНК. Их добавили к левому и правому фрагментам ITR в случайной ориентации с использованием сшивки ДНК-лигазой таким образом, чтобы сохранить всю исходную опубликованную последовательность HPXV. В качестве маркера, позволяющего отобрать клоны scHPXV, в локус HPXV095 (тимидинкиназа) внутри третьего фрагмента была вставлена кассета, кодирующая желтый флуоресцентный белок, слитый с белком гуанинфосфорибозилтрансферазой (YFP-gpt), находящимся под контролем раннего-позднего промотора поксвируса. Схема сконструированного генома scHPXV YFP-gpt::095 приведена на рисунке 3.

Сборку генома вируса проводили трансфекцией клеток BGМК (клетки почек зеленой мартышки), предварительно инфицированных SFV. Размножившиеся вирусы⁶ собирали путем замораживания-оттаивания, разбавляли и повторно высевали на перевиваемые клетки почки африканской зеленой мартышки (BSC-40). scHPXV YFP-gpt::095 от-

⁴ Department of Medical Microbiology & Immunology and Li Ka Shing Institute of Virology, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, Tonix Pharmaceuticals, Inc., New York, New York, United States of America.

⁵ Каким методом синтезированы такие последовательности ДНК, не указано.

⁶ По меткому замечанию К. Вентера, «вирус вне клетки не живет кристалла соли» [3]. Способность к воспроизводству он получает только, если его геном сможет мобилизовать ресурсы клетки, что и сделано в данном эксперименте благодаря вирусу-помощнику – SFV.

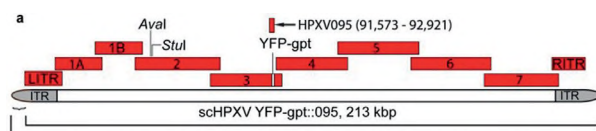


Рисунок 3 – Промежуточный геном scHPXV, использованный для получения химерного варианта вируса оспы лошадей (рисунок адаптирован авторами из работы R.S. Noyce с соавт. [13])

Figure 3: Intermediate scHPXV genome used to generate a chimeric horsepox virus variant (the figure is adapted by the authors from R.S. Noyce et al. [13])

бирали, используя желтую флуоресценцию в качестве критерия отбора. Затем селекционный маркер YFP-gpt удаляли с помощью гомологичной рекомбинации. Для этого фирме ThermoFisher Scientific был заказан фрагмент ДНК длиной 1349 п.н., кодирующий нуклеотиды HPXV 91573–92921, и включающий ген HPXV095 плюс ~ 400 п.н. гомологии, фланкирующие обе стороны локуса тимидинкиназы. Эта ДНК была клонирована в коммерческий вектор, предоставленный GeneArt. Для замены кассеты YFP-gpt клетки и «возвращения на место» локуса тимидинкиназы, клетки BSC-40 инфицировали scHPXV YFP-gpt::095, а затем трансфицировали в них линейаризованную плазмиду и типовыми вирусологическими методами выделяли нефлуоресцентные вирусы. Геном scHPXV был депонирован в GenBank под номером доступа KY349117. Сравнить его биологические свойства с таким же вирусом, циркулирующим в природе, невозможно, так как его природный резервуар неизвестен, у лошадей в настоящее время его не находят.

Получение синтетических производных SARS-CoV-2. X. Xie с соавт. [15] собрали производные SARS-CoV-2 из 7 синтетических фрагментов ДНК. Сначала их клонировали в плазмиды, затем в условиях *in vitro* с помощью ДНК-лигазы фага T4 сшивали в полноразмерную ДНК SARS-CoV-2. Полноразмерную плюс-РНК вируса получали на матрице ДНК РНК-полимеразой. С помощью электропорации ее вводили в перmissive клетки (Vero E6 или BHK-21), где она запускала сборку вирусных частиц за счет ресурсов клетки. Полногеномным секвенированием по Сэнгеру подтверждали соответствие РНК синтетического SARS-CoV-2 консенсусной последовательности SARS-CoV-2.

Платформа, использующая для создания синтетических РНК-вирусов TAR-технология, более функциональна. T.N. Thao с соавт. [16] из восьми перекрывающихся фрагментов ДНК воссоздали вирус гепатита мышей

MHV A59 и коронавирус ближневосточного респираторного синдрома (MERS-CoV). Так же они клонировали другие коронавирусы: HCoV-229E2, HCoV-NKU1, MERS-CoV-Riyadh-1734-2015; и вирусы других семейств, такие как вирус Zika из семейства *Flaviviridae* (GenBank: KX377337) и респираторно-синцитиальный вирус человека из семейства *Pneumoviridae* (hRSV). Клонирование этих вирусных геномов с помощью технологии TAR во всех случаях было успешным, независимо от источника вируса, матрицы нуклеиновой кислоты или количества фрагментов ДНК. Клонирование hRSV-B осуществлено без какой-либо предварительной информации о геноме вируса, непосредственно из клинического образца (носоглоточный аспират) из четырех перекрывающихся фрагментов ДНК (GenBank: MT107528).

Синтетические копии вирусов могут по биологическим свойствам не отличаться от циркулирующих в природе. По данным Ch. Ye с соавт. [17] синтетический SARS-CoV-2 при интраназальном инфицировании золотых сирийских хомячков проявлял ту же способность к репликации, вирулентность и патогенность, что и естественный изолят SARS-CoV-2.

Изучение биологии химерных коронавирусов. V.D. Menachery с соавт. [18] методом обратной генетики был создан ранее не существовавший вирус – SHC014-MA15, способный к репликации в дыхательных путях человека и животных. Для этого в нуклеотидную последовательность субъединицы S1, циркулирующего среди летучих мышей коронавируса SHC014 – ближайшего «родственника» SARS-CoV, и не проявившего себя в качестве патогена для людей из-за различия по 14 аминокислотным остаткам в участке шипа, связывающегося с ACE2 человека, были внесены точечные изменения. Исследователи заменили нуклеотидную последовательность гена, кодирующего субъединицу S1 у SHC014, на аналогичную от SARS-CoV. Остальные гены, т.е. те, которые определяют формирование транскрипционного комплекса вирусной репликации и сборку его частиц в клетке, изменениям не подвергались.

Моноклональные антитела (мАТ) широкого защитного спектра (109.8, SHC014-MA15, 230.15 и 227.14), показавших хороший нейтрализующий эффект против SARS-CoV, оказались неэффективными в отношении SHC014-MA15.

Эксперименты с синтетическими коронавирусами, поражающими сельскохозяйственных животных. В последние годы в конструирование химер стали вовлекаться

коронавирусы сельскохозяйственных животных. С применением CRISPR/Cas9-технологии получен дельта-коронавирус свиней (Porcine deltacoronavirus, PDCoV), обнаруженный в Гонконге в 2012 г. Это новый и плохо изученный коронавирус, вызывающий острую диарею и высокую летальность среди заболевших поросят. У ветеринаров он вызывает опасения из-за широкого круга межвидовых носителей, включая людей. Куры, индюшата и телята могут быть экспериментально заражены PDCoV. Сконструированный с помощью TAR инфекционный клон PDCoV, обладает биологическими характеристиками, схожими с характеристиками штамма дикого типа [19]. То есть это очередной «фальшивый вирус», способный появиться на животноводческих фермах независимо от своих природных резервуаров.

Результаты отдельных экспериментов позволили показать возможность повышения вирулентности синтетических коронавирусов и обнаружить изменения в патогенезе вызванной ими болезни. Например, введением фуринового сайта в S-белок вируса бронхита кур (infectious bronchitis virus, IBV), вызывающего у молодняка поражение органов дыхания, репродуктивных органов и нефрозонефритный синдром, была переключена его тропность с клеток дыхательных путей и мочеполовой системы на клетки ЦНС. Наблюдались поражения ЦНС: значительная гиперплазия микроглии, образование микроглиальных узелков и периваскулярные воспалительные инфильтраты в ткани мозга [20].

Эксперименты с синтетическими вирусами, поражающими сельскохозяйственные растения. Большая часть населения мира удовлетворяет свои потребности в калориях за счет растительной пищи, такой как пшеница, рис и кукуруза. Весь опыт человеческой цивилизации свидетельствует о том, что массовый голод по жертвами сопоставим с применением ядерного оружия [21]. В практическом аспекте, уничтожение сельскохозяйственных посевов – наиболее древнее средство тотальной войны, позволяющее не убивая людей и животных, не разрушая городов и предприятий, победить сильного врага [22]⁷.

Синтетические вирусы растений – новый инструмент биологической войны. Большинство вирусов растений имеют небольшие геномы из одноцепочечной РНК (+) – т.е. «готовой» мРНК, которую рибосомы растения

могут сразу транслировать в белок без стадии ДНК-транскрипции в ядре. Ими можно манипулировать через кДНК вируса, транскрибировать *in vitro* или *in planta* (введение кДНК в растение через агробактерию, где она транскрибируется в вирусную РНК с помощью белок-синтезирующей системы растения).

Для получения синтетических вирусов растений используются методы обратной генетики (РНК-вирусы) и сборки крупноблочных синтетических ДНК-последовательностей (ДНК-вирусы). Основная цель сборки инфекционных клонов – создание плазмидных векторов, содержащих точную копию вирусного генома, способную в подходящих условиях запустить инфекцию, имитирующую естественную.

Поражения синтетическими вирусами растений на больших площадях возможно распространением с беспилотников:

- аэрозолей и капель генетически модифицированных бактерий *Agrobacterium tumefaciens*, содержащих плазмидные векторы с копиями вирусных геномов;
- углеродных нанотрубок (УНТ) и магнитных наночастиц, загруженных ДНК, кодирующей геномы вирусов [27];
- синтетических вирусов с клонированными генами белков, вызывающих патологические процессы у растений и способных передаваться между ними [28].

Новой двойной технологией можно считать редактирование генома растений с помощью вирусных векторов, кодирующих гидовую РНК (guide RNAs, gRNAs: гРНК), в том числе CRISPR-Cas9 [29].

Применение *Agrobacterium*. Важным открытием в вирусологии растений стало доказательство способности почвенной бактерии *A. tumefaciens* – возбудителя коронной галловой болезни (образование опухолей) у более чем 140 видов растений, способности инициировать вирусные инфекции после обработки их листьев штаммами, содержащими инфекционные клоны растительных вирусов [30]. Способ заражения растений посредством *Agrobacterium* разработан почти 30 лет назад. Он заключался в нанесении на ткани растения раствора, содержащего *A. tumefaciens*, 5 % сахарозы и 500 мкл/л органосиликонового поверхностно-активного вещества (ПАВ) Silwet L-77. Сахароза и ПАВ играют в этой рецептуре решающую роль в успешной трансформации растений [31]. *Agrobacterium* способны инфицировать дву-

⁷ Описания наиболее опасных патогенов растений приведены в работах [23–25]; достижения Холодной войны в практике войны против сельскохозяйственных растений, приведены в нашей работе [26].

дольные и однодольные растения, а также травянистые и древесные культуры, включая цитрусовые, виноград и яблоню [32].

Одна или несколько копий вирусных геномов встраиваются между левой и правой границами Т-ДНК плазмиды, пригодной для репликации в *Agrobacterium*. При контакте бактерий с растительными тканями Т-ДНК кассеты переносятся в клетки хозяина, и транскрипция с последующей трансляцией Т-ДНК приводит к синтезу вирусных компонентов, необходимых для инициации инфекционного процесса. Т-ДНК кассеты не требуют стабильной интеграции в геном хозяина. Для заражения растения достаточно и временной экспрессии трансгена [32].

Обобщающая схема сборки инфекционных клонов вирусов растений показана на рисунок 4.

Ниже приведены несколько примеров, показывающие возможности синтетической биологии для получения вирусов растений с усиленными функциями.

Применение вируса табачной мозаики для инициирования ложной патологии растений. Объектом таких исследований стал вирус табачной мозаики (Tobacco mosaic virus, TMV) – одноцепочечный РНК-вирус с положительным геномом, поражающий в основном растения из семейства пасленовых и, что особенно важно, табака. Он проникает в растение через микротравмы на поверхности листьев или стеблей, и передается от растения к растению. В окружающей среде устойчив к физическим факторам.

Геном TMV расшифрован в 1982 г., но не полностью. Инфекционной эталонной последовательности молекулы ДНК до 2014 г. не существовало. В. Соопер [28] из Лаборатории геномики и улучшения сортов сои Минсельхоза США, синтезировал такую последовательность ДНК из перекрывающихся олигонуклеотидов учитывая консенсус с другими последовательностями TMV. ДНК была транскрибирована в РНК (1-34СЕ-30) и упакована в вирионы с помощью очищенного капсида TMV. Полученный синтетический вирус (FL-TMV-NA) вызывал характерные симптомы болезни у табака. Затем были созданы химеры ДНК TMV с ДНК капсидного белка вируса мозаики томата (Tomato mosaic virus, ToMV) и вируса полосатой мозаики ячменя (Barley stripe mosaic virus, BSMV). Вирус, экспрессирующий капсидный белок ToMV, у *Nicotiana glauca* (1-34СЕ-ToMV CP-30), вызывал симптомы болезни, похожие на симптомы ToMV, т.е. в данном эксперименте был получен вирус с GOF, вводящий в заблуждение относительно этиологии болезни

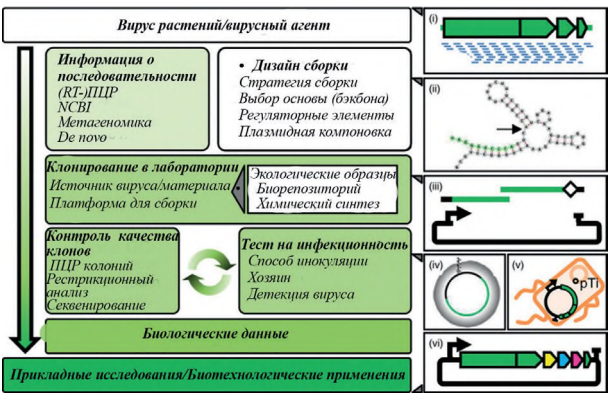


Рисунок 4 – Схема сборки инфекционных клонов рас вирусов растений. Справа, сверху вниз, представлены ключевые этапы сборки: i – идентификация вируса с помощью короткочитаемого секвенирования; ii – разработка регуляторного элемента (например, рибозима) для повышения эффективности инокуляции; iii – одностадийная сборка генома вируса и регуляторных элементов в бинарный вектор на основе перекрывающей-ПЦР; iv – проверка полноразмерных клонов секвенированием (в данной работе короткочитаемое секвенирование Illumina); v – тесты на инфекционность с помощью *Agrobacterium*-опосредованной инокуляции (pTi, дефектная Ti-плаزمиды); vi – конструирование вирусных векторов для экспрессии гетерологичных белков в растениях (рисунок адаптирован авторами из работы F. Pasin et al. [27])

Figure 4: Schematic of infectious clone assembly for plant viruses. The key assembly steps are shown on the right (top to bottom): i, virus identification via short-read sequencing; ii, regulatory element design (e.g., ribozyme) to enhance inoculation efficiency; iii, one-step assembly of viral genome and regulatory elements into a binary vector using overlap extension PCR; iv, full-length clone verification by sequencing (Illumina short-read sequencing in this study); v, infectivity testing via *Agrobacterium*-mediated inoculation (using a disarmed Ti plasmid, pTi); vi, engineering of viral vectors for heterologous protein expression in plants (the figure is adapted by the authors from F. Pasin et al. [27])

[28]. Таким образом, приобретение TMV усиленных функций проявилось расширением круга хозяев и способностью вызывать инфекцию у растений табака с нехарактерными для нее симптомами болезни.

Превращение латентного вируса растений в инфекционный. Вирус латентной инфекции алжирского винограда (Grapevine Algerian latent virus, GALV) – представитель рода *Tombusvirus*, впервые выделен в 1989 г. из винограда (*Vitis* spp.) алжирского происхождения. Впоследствии его обнаруживали в пробах воды на западе Сицилии, из канав и ручьев в сельскохозяйственных районах Германии, а также у культивируемых декоративных растений. За 20 лет, предшествующих

исследованию итальянских ученых А. Lovato с соавт.⁸ [33], сообщений о естественном заражении винограда GALV не поступало, сведения об искусственной инокуляции виноградных растений отсутствовали. Эпидемическое исследование кДНК, полученных от 152 растений винограда с симптомами, похожими на вирусные, не выявило присутствия GALV ни в одном из образцов.

Исследователи провели филогенетический анализ всех известных последовательностей GALV и эпидемическое исследование образцов виноградной лозы для выявления вируса. Клон GALV-Nf под контролем промотора фага T7 был химически синтезирован на основе полноразмерной последовательности изолята вируса, выделенного из декоративного ядовитого растения из Южной Америки – *Solanum mammosum* (nipplefruit, Содомское яблоко), единственно доступного на момент разработки проекта. Его вставили в бинарный вектор pK7WG2-MCS.HRz.GALV-Nf [33].

Инфекционные транскрипты GALV-Nf протестировали на *N. benthamiana*. Через 4 сут на инокулированных листьях появились сливающиеся хлоротические пятна, а через 7 сут после инокуляции, начиная с проксимальной части листа, развился системный хлороз жилок. Ультраструктурные изменения, вызванные GALV-Nf у *N. benthamiana*, были аналогичны тем, которые вызывают вирусы рода *Tombusvirus* у других растений. Специфический инфекционный процесс подтвержден серологическим и молекулярным анализами. Растения винограда, взятые в эксперимент, представляли различные генотипы, выращенные из соматических эмбрионов, чтобы избежать возможного влияния необнаруженных вирусов или вироидов. Через 5 нед. после инфильтрации на молодых листьях обнаружены симптомы болезни. Наблюдалось неравномерное хлоротическое окрашивание основных жилок листьев у растений *V. riparia*, небольшое закручивание краев листьев вверх у растений сорта Султания (Sultanina) и легкое крапчатое окрашивание листьев у растений сорта Корвина (Corvina Veronese). Эффективность заражения составляла ~90 %. Наиболее уязвимым к синтетическому GALV-Nf оказался сорт Неббиоло.

Ультраструктурный анализ листьев виноградной лозы, пораженных GALV-Nf, показал наиболее сильное поражение клеток, прилегающих к мелким жилкам, особенно в губчатом мезофилле [33].

Одной из причин приобретения GALV усиленных функций, проявившихся в инфек-

ционности для отдельных сортов винограда, стало использование полноразмерной последовательности изолята вируса ядовитого растения *S. mammosum*, которая не содержала «ошибок», т.е. отдельных точечных мутаций в геноме этого же вируса из виноградной лозы алжирского происхождения.

Идентификация вирусов, полученных методами синтетической биологии. Теоретически, если синтез нуклеотидной последовательности был проведен с идеальной точностью, и она собрана методом бесшовной сборки (например, Gibson Assembly), то «фальшивый вирус» на уровне генома неотличим от природного. Однако есть нюансы:

- в геноме могут быть обнаружены замены нуклеотидной последовательности синтезируемого вируса на взятые от других вирусов. Например, как это сделали R.S. Нойсе с соавт. [13], собиравшие геном scHPXV – они заменили его шпилечные теломеры (сведения о которых в базах отсутствовали) двумя известными синтетическими шпилечными структурами, взятыми из генома VACV WR. Для синтеза Bat-SCoV, SARS-подобного вируса летучих мышей, М.М. Becker с соавт. [34] использовали функциональные 5'-UTR и регуляторные последовательности транскрипции от SARS-CoV, поскольку нуклеотидная последовательность 5'-UTR Bat-SCoV оказалась неполной;

- внесены изменения в критически важные для проявления вирулентности и специфичности участки генома вируса, например, введение последовательности для расщепления фурином между последовательностями, кодирующими S1- и S2-субъединицы спайкового белка вируса бронхита кур [19]; или замена нуклеотидной последовательности гена, кодирующего субъединицу S1 у коронавируса летучих мышей SHC014, на аналогичную от SARS-CoV [17];

- признаки консенсусного проектирования – последовательность ДНК синтезирована из перекрывающихся олигонуклеотидов, и подогнана под консенсус с другими последовательностями (т.е. такого индивидуального генома в природе не существует), как это сделал В. Cooper [28] с геном TMV, и М.М. Becker с соавт. [34] при сборке генома вируса летучих мышей – Bat-SCoV;

- наличие «шрамов сборки» – если использовался небесшовный метод клонирования, например, по рестрикционным сайтам, в этом случае об искусственном происхождении вируса говорят последовательности

⁸ Университеты в Милане, Вероне, Тоскане и ряд других организаций.

сайтов рестрикции (*EcoRI* оставляет шрам GAATTC, *BamHI* – GGATCC) или линкеров;

- обнаружение генома вымершего вида [13, 35];

- обнаружение сайта *LoxP*, оставшегося после TAR-сборки, если использовалась технология точного редактирования генома с помощью системы Cre-рекомбиназа-*loxP* (сайт связывания белка Cre). Между сайтами *LoxP* можно удалять, инвертировать или вставлять гены, но сайт остается [36];

- наличие адаптивных мутаций, появившихся при пассировании синтезированных крупных ДНК-содержащих вирусов в культурах клеток [37];

- невозможность в ходе синтеза ДНК правильно воспроизвести метки эпигенетической регуляции (паттерны метилирования, ошибки в укладке РНК – некорректные петли в шпильках и др.), регулирующие активность генов, не изменяя саму последовательность ДНК [38];

- «чужие» промоторные последовательности векторов в геноме жертвы. Например, в Т-клетках умерших от Т-клеточной лейкемии детей, обнаружен интегрировавшийся с их геномом ретровирусный вектор с клонированным трансгеном *LMO2* (кодирует транскрипционный активатор факторов, необходимый для дифференциации эритроцитов в костном мозге) и регуляторными элементами. При расследовании данного случая обнаружено, что этот ген находится под контролем LTR вируса мышиной лейкемии Молони, в геноме человека никогда не встречавшегося [39];

- филогенетические аномалии: рекомбинации между далекими штаммами, которые маловероятны в природе, варианты вируса без установленных предков [40];

- статистика кодонов – искусственные геномы могут демонстрировать неестественную оптимизацию кодонов, что можно выявить с помощью индекса адаптации кодонов (Codon Adaptation Index, CAI)⁹;

- «цифровые опечатки», оставленные коммерческими синтезаторами ДНК в виде специфических паттернов мутаций. Они могут проявляться в виде: подмены оснований; случайной «потери» олигонуклеотидных блоков – их не включают в итоговую расшифровку ДНК; ошибок при сборке фрагментов –

например, некоторые фрагменты ошибочно помечаются как повторы, неправильно происходит соединение фрагментов; SNP-паттерны (снимки), как ошибки Taq-полимеразы при синтезе фрагментов и др.¹⁰;

- «водяные знаки» в межгенных последовательностях, оставляемые честолюбивыми синтетическими биологами (примерно так, как художник ставит свою подпись на картине). Используются разные кодоны для представления каждой из двадцати букв аминокислотного «алфавита». Каждые три нуклеотида в этой записи соответствуют определенной аминокислоте, входящей в состав природных белков. Таких аминокислот всего 20, каждая из них, помимо традиционного химического названия, обозначается одной из букв латинского алфавита [3].

Заключение

Приведенные данные показывают состоявшийся переход синтетической биологии в цифровую, позволяющую распространять опасные патогены в любую часть мира в цифровом формате с последующей «материализацией» в лабораторных условиях. Технологический уровень синтетической биологии пока не позволяет ей выйти за пределы геномов вирусов и одноклеточных организмов. Однако он позволяет создавать вирусы с GOF, способные вызывать инфекционный процесс у людей, животных и растений. Добавленные функции включают расширение круга инфицируемых видов животных и растений; появление патогенности для людей у вирусов, ранее для них непатогенных; и способность вызывать инфекцию с нехарактерными для ее типичного течения симптомами болезни и поражениями внутренних органов. Технологии, позволяющие получение вирусов с GOF, доступны широкому кругу исследователей уже не менее 30 лет. Наиболее универсальной в настоящее время является платформа синтетической геномики TAR. Конвенционных механизмов, блокирующих распространение синтетических патогенов не существует. Фактически мы имеем дело с новой реальностью биологических угроз в медицине, животноводстве и растениеводстве, требующей разработки международных методов контроля.

⁹ Codon Adaptation Index. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Codon_Adaptation_Index (дата обращения: 10.08.2025).

¹⁰ Биоинформатическая обработка данных секвенирования. URL: <https://sesana.ru/bioinformaticeskaya-obrabotka-dannykh-sekvenirovaniya> (дата обращения: 10.08.2025).

Ограничения исследования / Limitations of the study

Обусловлены анализом только англоязычных статей из полнотекстовых англоязычных научных журналов, доступных через сеть Интернет / The limitations of the study are stipulated by the analysis of the articles retrieved from full-text academic periodicals, written in English and available on the Internet.

Список источников / References

1. Schindler D. Genetic Engineering and Synthetic Genomics in Yeast to Understand Life and Boost Biotechnology. *Bioengineering (Basel)*. 2020;7(4):137.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering7040137>
2. Wu Y, Gao S, Liu G, Wang M, Tan R, Huang B, Tan W. Development of viral infectious clones and their applications based on yeast and bacterial artificial chromosome platforms. *Mol Biomed*. 2025;6(1):26.
<https://doi.org/10.1186/s43556-025-00266-7>
3. Вентер К. Жизнь на скорости света. От двойной спирали к рождению цифровой биологии. М.; 2018.
Venter JC. *Life at the Speed of Light: From the Double Helix to the Dawn of Digital Life*. New York: Viking; 2013.
4. Venter JC, Glass JI, Hutchison CA 3rd, Vashee S. Synthetic chromosomes, genomes, viruses, and cells. *Cell*. 2022;185(15):2708-24.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.06.046>
5. Gibson DG, Benders GA, Andrews-Pfannkoch C, Denisova EA, Baden-Tillson H, Zaveri J, et al. Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome. *Science*. 2008;319(5867):1215-20.
<https://doi.org/10.1126/science.1151721>
6. Kuo L, Godeke GJ, Raamsman MJ, Masters PS, Rottier PJ. Retargeting of coronavirus by substitution of the spike glycoprotein ectodomain: crossing the host cell species barrier. *J Virol*. 2000;74(3):1393-406.
<https://doi.org/10.1128/jvi.74.3.1393-1406.2000>
7. Онищенко ГГ, Сизикова ТЕ, Лебедев ВН, Борисевич СВ. Новые представители рода *Orthopoxvirus*. *Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение*. 2023;12(2):8-13.
<https://doi.org/10.33029/2305-3496-2023-12-2-8-13>
- Onishchenko GG, Sizikova TE, Lebedev VN, Borisevich SV. New representatives of the genus *Orthopoxvirus*. *Infectious Diseases: News, Opinions, Training [Infektsionnye Bolezni: Novosti, Mneniya, Obuchenie]*. 2023;12(2):8-13. (in Russian).
<https://doi.org/10.33029/2305-3496-2023-12-2-8-13>
8. Koster CC, Postma ED, Knibbe E, Cleij C, Daran-Lapujade P. Synthetic Genomics From a Yeast Perspective. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:869486.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.86948>
9. Kouprina N, Larionov V. Selective isolation of genomic loci from complex genomes by transformation-associated recombination cloning in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Nat Protoc*. 2008;3(3):371-7.
<https://doi.org/10.1038/nprot.2008.5>
10. Kouprina N, Larionov V. Transformation-associated recombination (TAR) cloning and its applications for gene function; genome architecture and evolution; biotechnology and biomedicine. *Oncotarget*. 2023;14:1009-33.
<https://doi.org/10.18632/oncotarget.28546>
11. Yang L, Tian L, Li L, Liu Q, Guo X, Zhou Y, et al. Efficient assembly of a large fragment of monkeypox virus genome as a qPCR template using dual-selection based transformation-associated recombination. *Virol Sin*. 2022;37(3):341-7.
<https://doi.org/10.1016/j.virs.2022.02.009>
12. Tulman ER, Delhon G, Afonso CL, Lu Z, Zsak L, Sandybaev NT, et al. Genome of horsepox virus. *J Virol*. 2006;80(18):9244-58.
<https://doi.org/10.1128/JVI.00945-06>
13. Noyce RS, Lederman S, Evans DH. Construction of an infectious horsepox virus vaccine from chemically synthesized DNA fragments. *PLoS One*. 2018;13(1):e0188453.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188453>
14. Yao XD, Evans DH. High-frequency genetic recombination and reactivation of orthopoxviruses from DNA fragments transfected into leporipoxvirus-infected cells. *J Virol*. 2003;77(13):7281-90.
<https://doi.org/10.1128/jvi.77.13.7281-7290.2003>
15. Xie X, Lokugamage KG, Zhang X, Vu MN, Muruato AE, Menachery VD, Shi PY. Engineering SARS-CoV-2 using a reverse genetic system. *Nat Protoc*. 2021;16(3):1761-84.
<https://doi.org/10.1038/s41596-021-00491-8>
16. Thi Nhu Thao T, Labrousseau F, Ebert N, V'kovski P, Stalder H, Portmann J, et al. Rapid reconstruction of SARS-CoV-2 using a synthetic genomics platform. *Nature*. 2020;582(7813):561-5.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2294-9>

17. Ye C, Chiem K, Park JG, Oladunni F, Platt RN 2nd, Anderson T, et al. Rescue of SARS-CoV-2 from a Single Bacterial Artificial Chromosome. *mBio*. 2020;11(5):e02168-20.
<https://doi.org/10.1128/mBio.02168-20>
18. Menachery VD, Yount BL Jr, Debbink K, Agnihothram S, Gralinski LE, Plante JA, et al. A SARS-like cluster of circulating bat coronaviruses shows potential for human emergence. *Nat Med*. 2015;21(12):1508-13.
<https://doi.org/10.1038/nm.3985>
19. Wang K, Liu L, Li Y, Xu Q, Wang H, Yang X. Construction of HiBiT-tagged porcine deltacoronavirus via NanoBiT split-luciferase system and its utility in antiviral research. *Vet Microbiol*. 2025;307:110623.
<https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2025.110623>
20. Cheng J, Zhao Y, Xu G, Zhang K, Jia W, Sun Y, et al. The S2 Subunit of QX-type Infectious Bronchitis Coronavirus Spike Protein Is an Essential Determinant of Neurotropism. *Viruses*. 2019;11(10):972.
<https://doi.org/10.3390/v11100972>
21. Whitby SM. The potential use of plant pathogens against crops. *Microbes Infect*. 2001;3(1):73–80.
[https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(00\)01348-4](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(00)01348-4)
22. Рожнятовский Т, Жултовский З. Биологическая война. Угроза и действительность. М.; 1959.
Rozhnjatovskij T, Zhultovskij Z. *Biological Warfare. Threat and Reality*. Moscow; 1959 (in Russian).
23. Scholthof KB, Adkins S, Czosnek H, Palukaitis P, Jacquot E, Hohn T, et al. Top 10 plant viruses in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol*. 2011;12(9):938–54.
<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00752.x>
24. Mansfield J, Genin S, Magori S, Citovsky V, Sriariyanum M, Ronald P, et al. Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol*. 2012;13(6):614–29.
<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00804.x>
25. Schwelm A, Badstöber J, Bulman S, Desoignies N, Etemadi M, Falloon RE, et al. Not in your usual Top 10: protists that infect plants and algae. *Mol Plant Pathol*. 2018;19(4):1029–34.
<https://doi.org/10.1111/mpp.12580>
26. Супотницкий МВ. Биологическая война против сельскохозяйственных посевов: исторический аспект и конвенционный контроль. *Вестник войск РХБ защиты*. 2025;9(1):44–56. EDN:vxkuif.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-1-44-56>
Supotnitskiy MV. Biological Warfare against Agricultural Crops: Historical Aspects and Conventional Control. *Journal of NBC Protection Corps*. [Vestnik vojsk RHB zashhity]. 2025;9(1):44–56. EDN:vxkuif (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-1-44-56>
27. Pasin F, Menzel W, Daròs JA. Harnessed viruses in the age of metagenomics and synthetic biology: an update on infectious clone assembly and biotechnologies of plant viruses. *Plant Biotechnol J*. 2018;17(6):1010-26.
<https://doi.org/10.1111/pbi.13084>
28. Cooper B. Proof by synthesis of Tobacco mosaic virus. *Genome Biol*. 2014;15(5):R67.
<https://doi.org/10.1186/gb-2014-15-5-r67>
29. Weiss T, Kamalu M, Shi H, Li Z, Amerasekera J, Zhong Z, et al. Viral delivery of an RNA-guided genome editor for transgene-free germline editing in *Arabidopsis*. *Nat Plants*. 2025;11(5):967-76.
<https://doi.org/10.1038/s41477-025-01989-9>
30. Grimsley N, Hohn B, Hohn T, Walden R. «Agroinfection», an alternative route for viral infection of plants by using the Ti plasmid. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1986;83(10):3282-6.
<https://doi.org/10.1073/pnas.83.10.3282>
31. Clough SJ, Bent AF. Floral dip: a simplified method for *Agrobacterium*-mediated transformation of *Arabidopsis thaliana*. *Plant J*. 1998;16(6):735-43.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.1998.00343.x>
32. Krenek P, Samajova O, Luptovciak I, Doskocilova A, Komis G, Samaj J. Transient plant transformation mediated by *Agrobacterium tumefaciens*: Principles, methods and applications. *Biotechnol Adv*. 2015;33(6 Pt 2):1024-42.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.03.012>
33. Lovato A, Faoro F, Gambino G, Maffi D, Bracale M, Polverari A, Santi L. Construction of a synthetic infectious cDNA clone of Grapevine Algerian latent virus (GALV-Nf) and its biological activity in *Nicotiana benthamiana* and grapevine plants. *Virol J*. 2014;11:186.
<https://doi.org/10.1186/1743-422X-11-186>
34. Becker MM, Graham RL, Donaldson EF, Rockx B, Sims AC, Sheahan T, et al. Synthetic recombinant bat SARS-like coronavirus is infectious in cultured cells and in mice. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2008;105(50):19944-9.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0808116105>
35. Ng TF, Chen LF, Zhou Y, Shapiro B, Stiller M, Heintzman PD, et al. Preservation of viral genomes in 700-y-old caribou feces from a subarctic ice patch. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2014;111(47):16842-7.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1410429111>

36. Yu D, Smith GA, Enquist LW, Shenk T. Construction of a self-excisable bacterial artificial chromosome containing the human cytomegalovirus genome and mutagenesis of the diploid TRL/IRL13 gene. *J Virol*. 2002;76(5):2316-28.
<https://doi.org/10.1128/jvi.76.5.2316-2328.2002>
37. Vashee S, Stockwell TB, Alperovich N, Denisova EA, Gibson DG, Cady KC, Miller K, et al. Cloning, Assembly, and Modification of the Primary Human Cytomegalovirus Isolate Toledo by Yeast-Based Transformation-Associated Recombination. *mSphere*. 2017;2(5):e00331-17.
<https://doi.org/10.1128/mSphereDirect.00331-17>
38. Liu XF, Wang X, Yan S, Zhang Z, Abecassis M, Hummel M. Epigenetic control of cytomegalovirus latency and reactivation. *Viruses*. 2013;5(5):1325-45.
<https://doi.org/10.3390/v5051325>
39. Hacein-Bey-Abina S, Garrigue A, Wang GP, Soulier J, Lim A, Morillon E, Clappier E, et al. Insertional oncogenesis in 4 patients after retrovirus-mediated gene therapy of SCID-X1. *J Clin Invest*. 2008;118(9):3132-42.
<https://doi.org/10.1172/JCI35700>
40. Kämmerer U, Pekova S, Klement R. RT-PCR Test Targeting the Conserved 5'-UTR of SARS-CoV-2 Overcomes Shortcomings of the First WHO-Recommended RT-PCR Test. *International Journal of Vaccine Theory, Practice, and Research*. 2023;3(1):818-46.
<https://doi.org/10.56098/ijvtp.v3i1.71>

Вклад авторов / Authors' contridutions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **М.В. Супотницкий** – разработка концепции статьи; сбор, анализ и систематизация научной литературы; написание статьи; **Н.В. Шачнева** – подготовка рисунков и редактирование текста / All the authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions were as follows. **M.V. Supotnitskiy** – elaboration of the concept of the paper; collection, analysis, and systematization of scientific literature; writing and edition of paper; **N.V. Shachneva** – preparation of drawings, editing of the text.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах / Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Супотницкий Михаил Васильевич. Главный специалист Центра, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3193-1032>

Шачнева Наталья Владимировна. Научный сотрудник отдела.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l@mil.ru

Контактное лицо: Супотницкий Михаил Васильевич; 27nc_l@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Mikhail V. Supotnitskiy. Senior Researcher. Chief Specialist. Cand. Sci. (Biol.).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3193-1032>

Natalia V. Shachneva. Researcher of the Department.

Contact information for all authors: 27nc_l@mil.ru

Contact person: Mikhail V. Supotnitskiy; 27nc_l@mil.ru



Параметры маскировки объектов аэрозолями и способ их установления

А.А. Брусенин[✉], В.Н. Пенязь, Д.Н. Буряк, И.В. Артамонов, Д.С. Горбачев

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации,
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27nc_1@mail.ru

Основные моменты

- Новые параметры маскировки должны учитывать вероятность скрывания пространства и вероятность искажения наблюдаемой картины прозрачным аэрозолем за счет изменения первоначального направления квантов света прозрачными частицами.

- Для проверки теоретических положений предложена экспериментальная установка измерения прямых и измененных квантов света с последующей математической обработкой результатов.

Актуальность. Маскировка объектов аэрозолями для противодействия средствам разведки и управления оружием противника сохраняет актуальность, что подтверждается опытом выполнения задач в специальной военной операции (СВО).

Цель работы – установление параметров маскировки объектов аэрозолями, обусловленного влиянием частиц аэрозоля на распространение в пространстве видимого спектра света (электромагнитного излучения – ЭМИ), несущего информацию о маскируемом объекте и фоне.

Источниковая база исследования. Предыдущие статьи авторов по маскировке объектов аэрозолями, опубликованные в «Вестнике войск РХБ защиты» (2021–2024 гг.).

Метод исследования. Системный анализ прежних подходов теории маскировки объектов аэрозолями с использованием классических взглядов на взаимодействие квантов света при их прохождении сквозь прозрачную и непрозрачную среду (совокупность частиц аэрозоля).

Результаты. Выявлены недостатки прежних подходов теории маскировки, не учитывающих дисперсность аэрозоля (их размер) и разницу взаимодействия света с прозрачным и непрозрачным аэрозолем.

Заключение. Основные параметры для маскировки объектов с помощью аэрозолей должны включать: коэффициент пространственного затенения (доля пространства, перекрываемого аэрозольными частицами от наблюдателя или оптического прибора), коэффициент искажения траектории фотонов (доля квантов света, которые после взаимодействия с прозрачными частицами отклоняются от своей первоначальной траектории и проецируются на неверные точки наблюдаемого объекта или фона). Общая вероятность маскировки определяется как сумма этих независимых вероятностных событий. Для экспериментального определения вероятностей маскировки и искажения с использованием прозрачных аэрозолей предлагается установка, включающая: стандартную аэрозольную камеру и две дифракционные решетки: первая решетка создает первичный источник плоскополяризованного света, вторая решетка выполняет функцию приемника с противоположащими подвижными секторами, предназначенного для измерения интенсивности света в дискретных угловых интервалах при полном повороте измерительного устройства на 360°. Разработана специальная математическая модель для обработки экспериментальных данных и расчета параметров маскировки.

Ключевые слова: вероятность маскировки; вероятность скрывания и искажения объекта и фона маскирующим аэрозолем; закон Малюса; маскировка аэрозолями; поляризация света; прямые и искаженные лучи видимого спектра ЭМИ

Для цитирования: Брусенин А.А., Пенязь В.Н., Буряк Д.Н., Артамонов И.В., Горбачев Д.С. Параметры маскировки объектов аэрозолями и способ их установления. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):228–239. EDN:vhpeqo.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-228-239>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

© А.А. Брусенин, Д.Н. Буряк, В.Н. Пенязь, И.В. Артамонов, Д.С. Горбачев, 2025

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 13.05.2025 г. После доработки 25.05.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Parameters for masking objects with aerosols and the method of their establishment

Albert A. Brusenin[✉], Vladimir N. Penjaz', Dmitry N. Buryak, Ilya V. Artamonov, Dmitry S. Gorbachev

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

- The new camouflage parameters must account for the probability of concealing space and the probability of distorting the observed image by a transparent aerosol due to the change in the initial direction of light quanta by transparent particles.

- To verify the theoretical propositions, an experimental setup has been proposed to measure direct and altered light quanta, followed by mathematical processing of the results.

Relevance. The use of aerosol obscurants for camouflaging objects against enemy reconnaissance and weapon guidance systems remains a critical task, as evidenced by operational experience in the Special Military Operation (SMO).

Purpose of the study is to determine aerosol masking parameters. They are stipulated by the impact of aerosol particles on visible light range distribution in space (electromagnetic impulse), which contains data on objects to be masked and their background.

Study base sources. Previous articles of these authors on aerosol masking that were published in the Journal of NBC Protection Corps in 2021–2024.

Method. The authors of this article have conducted a comprehensive analysis of the previous approaches to the object aerosol masking and analyzed the traditional opinions about the light quanta interaction when they go through transparent and non-transparent media (aerosol particle assembly).

Results. The authors have identified the shortcomings of the previous approaches to the object aerosol masking, which neglected the aerosol size distribution and the difference in light interactions between transparent and non-transparent aerosols.

Conclusions. The primary parameters for aerosol-based object concealment should include: the spatial obscuration ratio (fraction of space occluded by aerosol particles from an observer or optical device), the photon path distortion ratio (portion of light quanta that, after interacting with transparent particles, deviate from their original trajectory and project onto incorrect points of the observed object or background). The total camouflage probability is defined as the sum of these independent probabilistic events. For experimental determination of concealment and distortion probabilities using transparent aerosols, we propose a setup comprising: a standard aerosol chamber and two diffraction gratings: the first grating generates an initial source of plane-polarized light, the second grating functions as a receiver with opposing movable sectors, designed to measure light intensity at discrete angular intervals during a complete 360° rotation of the measurement device. A dedicated mathematical framework has been developed to process the experimental data and calculate the camouflage parameters.

Keywords: aerosol masking; camouflage probability; direct and distorted rays of electromagnetic impulse visible range; light polarization; Malus Law; probability for concealment and distortion of objects and background by a masking aerosol

For citation: Brusenin A.A., Penjaz' V.N., Buryak D.N., Artamonov I.V., Gorbachev D.S. Parameters for masking objects with aerosols and the method of their establishment. *Journal of NBC Protection Corps*. 2025;9(3):228–239. EDN:vhpeqo.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-228-239>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF)

Received May 13, 2025. Revised May 25, 2025. Accepted September 27, 2025.

В настоящее время наиболее известным основным подходом при оценке эффективности маскировки является учет влияния яркости облака аэрозоля на сравнительный контраст между фоном и объектом.

При этом имеются расхождения в математических зависимостях учета яркости, например, в источнике [1] и в описании к патенту [2].

В источнике [1, стр. 44] контраст яркости, определяющий распознавание объекта на фоне без наличия аэрозоля, представлен в виде:

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / B_{\phi} \leq (0,01 - 0,02). \quad (1)$$

При этом авторы выдвигают гипотезу о снижении контрастности при маскировке аэрозолями за счет прибавки значения яркости аэрозольного облака (B_a) к знаменателю зависимости (1):

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / (B_{\phi} + B_a), \quad (2)$$

где: переменные B_{ϕ} , $B_{об}$, B_a соответствуют яркости фона, объекта и облака аэрозоля, Вт/(м²×ср).

В отличие от этого в патенте [2] данная зависимость трансформирована в следующем виде:

$$K = |(B_{\phi} - B_{об})| / (B_{\phi} + B_{об} + 2 \times B_a). \quad (3)$$

Одновременное суммирование в знаменателе яркостей объекта, фона и двойной яркости аэрозоля, по нашему мнению, не оправдано, поскольку при наблюдении объекта и фона линии визирования разные: фон с аэрозолями или объект с аэрозолями. В числителе зависимости (2) яркость аэрозоля отсутствует из-за их взаимного вычитания. А в знаменателе – она прибавляется однократно.

Можно отметить, что при внешней правильности зависимостей (1) и (2) возникает вопрос по поводу выбора единиц измерения яркости. Наличие «м²», по нашему мнению, неоправданно. Если фоном является небо, то непонятно: какую «глубину неба» авторы выбрали, поскольку свечение неба обусловлено атмосферой – «рыхлой» структурой? От выбранной глубины зависит площадь «среза неба», которая прямо пропорциональна квадрату этой величины в пределах телесного угла измерения. При сравнении яркостей объекта с фоном нет необходимости в использовании соответствующих величины площади объекта и фона, достаточно энергию разделить на телесный угол их наблюдения, предпочтительно по меньшему значению. О размерности яркости, как энергии, деленной на телесный угол, указывают и авторы [1, стр. 41]: «Однако во всех случаях яркость светящегося тела ABD остается неизменной и будет равна энергии, попавшей в точку F (F – точка измерения яркости) и деленной на телесный угол».

Самое главное замечание относительно влияния яркости облака на маскировку объекта (при обнаружении и идентификации) заключается в том, что предложенные зависимости (2), (3) не учитывают действие черных (непрозрачных и не «священных») аэрозолей. Дело в том, что с повышением интегральной концентрации аэрозоля по линии визирования (или плотности потока, г/м²), облако непрозрачного аэрозоля (черного дыма) по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу относительно видимого спектра электромагнитного излучения с минимизацией яркости. По зависимостям (2), (3) при снижении яркости аэрозольного облака заметность объекта повышается, но практика применения черных дымов это опровергает. В этой связи можно привести

зримый пример для любого наблюдателя: при значительной облачности отдельные участки облаков светлые, другие более темные. При этом можно слышать звук самолета за облаками, который становится видимым только в промежутке между ними. Исходя из теории яркости, темные участки облачности должны маскировать хуже. Но в реальности этого нет.

Выполненное нами моделирование показало, что при снижении размеров частиц аэрозоля вдвое, при равных концентрациях и длине линии визирования, вероятность скрытия возрастает почти в два раза [3]. Таким образом, не учет диаметра частиц является значимым недостатком прежней теории маскировки. Эквивалентность полученной нами в ходе исследований теоретической и практической зависимости Ламберта-Бера подтверждает объективность выбранного авторами данной статьи теоретического моделирования маскировки в части оценки доли скрытия пространства аэрозолем [4].

Цель работы – установление параметров маскировки объектов аэрозолями, обусловленного влиянием частиц аэрозоля на распространение в пространстве видимого спектра света (электромагнитного излучения – ЭМИ), несущего информацию о маскируемом объекте и фоне.

Источниковая база исследования. Предыдущие статьи авторов по маскировке объектов аэрозолями, опубликованные в «Вестнике войск РХБ защиты» (2021–2024 г.).

Метод исследования. Системный анализ прежних подходов теории маскировки объектов аэрозолями с использованием классических взглядов на взаимодействие квантов света при их прохождении сквозь прозрачную и непрозрачную среду (совокупность частиц аэрозоля).

Предлагаемый авторами статьи новый подход к оценке маскирующих параметров аэрозоля базируется на следующих положениях. Для маскировки объектов в настоящее время используются составы, формирующие прозрачные (воспринимаемые зрением как белые вследствие смещения ЭМИ различных длин волн или цветности) и черные дымы. Их действие различается:

черные дымы поглощают все кванты света, попавшие на частицы аэрозоля. Отсюда следует, что маскировка объекта этими дымами может характеризоваться долей скрытия (экранирования) пространства между наблюдателем и объектом с фоном частицами дыма. Кванты света, не задевшие аэрозоль, несут в себе изображение объекта за вычетом закрытой доли пространства. Способ расчета этой доли приведен в статье [4]. Необходимо

разделить кванты, свободно прошедшие через аэрозольное облако и встретившие частицы аэрозоля:

не задевшие аэрозоль кванты, и дошедшие беспрепятственно по прямой до глаз наблюдателя или окуляра оптического прибора, могут характеризоваться величиной прямого света – $I_{\text{пр}}$. Если из начального общего потока света (I_0) до аэрозольного облака (АО) вычесть прямой свет ($I_{\text{пр}}$) и разделить последнее на I_0 , то полученное частное будет соответствовать доле квантов, задевших аэрозольные частицы, что соответствует скрытию объекта. Черным аэрозолем все эти кванты поглощаются. Эта величина названа нами вероятностью скрытия объекта (P_c), поскольку имеет статистический характер [3]:

$$P_c = (I_0 - I_{\text{пр}}) / I_0. \quad (4)$$

Вероятность скрытия (доля квантов, встретивших аэрозоль) теоретически совпадает для черного и прозрачного аэрозоля при равных условиях (дисперсности и плотности потока). Эта же доля квантов, встретивших прозрачный аэрозоль, после многократного отражения от частиц аэрозоля и преломления при прохождении через них, разделяется на две части. Первая часть квантов, подвергнутая рассеиванию и отражению частицами АО, теряется в пространстве в стороны и назад. Вторая часть этих же квантов попадает в глаз наблюдателя (окуляр оптического прибора), но в связи с изменением своего первоначального направления, проецируются наблюдателем на другие участки фона или объекта, что приводит к искажению наблюдаемой области фона и объекта. Доля квантов света ($I_{\text{и}}$) от общего светового потока (I_0), прошедшая через прозрачный аэрозоль, и искажающих объект и фон, также имеет статистический смысл и названа нами вероятностью искажения ($P_{\text{и}}$):

$$P_{\text{и}} = I_{\text{и}} / I_0. \quad (5)$$

Отметим, что теоретическая доля квантов, искажающая объект ($P_{\text{и}}$), не может быть выше скрытия (P_c), так как доля этих квантов арифметически состоит из встретивших аэрозоль, за вычетом тех, которые из этого облака рассеиваются в пространстве. Таким образом, прозрачный аэрозоль к вероятности скрытия объекта черным аэрозолем (при прочих равных условиях) добавляет вероятность его искажения, что в целом повышает вероятность маскировки объекта прозрачным аэрозолем по сравнению с черным. Следует подчеркнуть, что носителем визуальной

информации об объекте или фоне являются не отдельные кванты света, а их агломераты, называемые пикселями, которые должны иметь угловой размер, достаточный для восприятия глазом человека [5]. Но в данной статье эффект нераспознавания из-за малого телесного угла видимых пикселей информации – не рассматривается, основной акцент уделяется эффектам скрытия и искажения объекта и фона прозрачным аэрозолем. Для формализации процесса маскировки аэрозолями, допустимо употреблять термин квант (или единичный световой луч), являющийся минимальной составляющей видимого света, взаимодействующего с аэрозолем, подразумевая, что совокупность этих квантов формирует световые потоки, о свойствах которых идет речь.

Предлагаемый нами аналитический вид зависимости расчета вероятности маскировки от вероятностей скрытия (P_c) и искажения ($P_{и}$) как суммы независимых случайных событий, представлен в виде:

$$P_m = P_c + P_{и} - (P_c \times P_{и}). \quad (6)$$

Исходя из приведенной зависимости, факт одинаковой маскировки самолета темными и светлыми участками облачности легко объясним. При высокой плотности аэрозоля прямых лучей, несущих информацию о картине за облаками, практически нет, то есть P_c предельно близко к 1. Яркость облачности определяется долей рассеянных в пространстве лучей света, часть из которых попадают в наши глаза. При этом, чем выше плотность аэрозоля, тем меньшая доля искаженных лучей «прорывается» к нам сквозь облачность, из-за потерь в пространстве, что соответствует темным его участкам. Математически это выражается следующим образом: и светлые и темные участки не пропускают прямые лучи, то есть P_c практически равно 1, при этом светлые участки пропускают для наблюдения большую долю начального рассеянного (искаженного по нашей терминологии) светового потока ($P_{и}$), например, 0,4, а темные – 0,1. Исходя из зависимости (6) эффект вероятности маскировки самолета облачностью для наземного наблюдателя для предложенных вариантов равен:

$$P_m = 1 + 0,4 - (1 \times 0,4) = 1, \quad (7)$$

$$P_m = 1 + 0,1 - (1 \times 0,1) = 1. \quad (8)$$

В качестве математической шутки: уравнение (6) работает и для ночных условий как некоторого эквивалента непрозрачного (абсолютно черного) аэрозоля с очень высокой

плотностью потока, когда прямых лучей нет, а доля искаженных равна нулю:

$$P_m = 1 + 0 - (1 \times 0) = 1. \quad (9)$$

Данный пример показывает, что при предлагаемом теоретическом подходе к маскировке, изменение яркости облака аэрозоля может и не оказывать влияния на ее качество, в противоположность теории яркости. Подчеркнем, что уравнения (2) и (3), оперирующие яркостью, для примеров с облачностью и действием «черного» аэрозоля теряют логический смысл, то есть вырождаются. Таким образом, яркость аэрозольного облака является косвенным показателем качества маскировки, а не определяющим.

Способ экспериментальной оценки маскировки измерением ослабления света, предложенный Г. Лучинским и Ю. Вейцером в 1947 г., практически сохранился до сих пор, рисунок 1. Главные составляющие установки: аэрозольная камера (АК), источник света, наблюдаемый объект и регистратор характеристик изменяемого аэрозолем света повторяется и у авторов патента [2]. Принципиальные отличия, по нашему мнению, заключаются в том, что измеряется и как, а также – какие исходные параметры учитываются при этих измерениях. Можно отметить, что за почти вековое существование теории яркости, экспериментальное влияние ее на маскировку никем не показано. И это не случайно, величина контрастности уравнений (1), (2) за счет внешней освещенности возрастающей (уменьшаемой) в N раз не меняется.

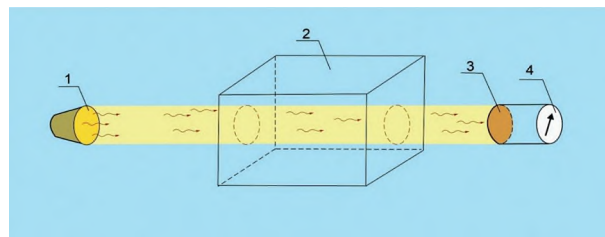


Рисунок 1 – Схема установки для экспериментального установления/ослабления потока света аэрозольной камерой (рисунок авторов): 1 – источник обычного света; 2 – аэрозольная камера; 3 – приемник света с фотоэлементом; 4 – микроамперметр для измерения потока света

Figure 1: Layout of facility that is aimed at experimental generating/diminishing of a light flow by an aerosol chamber (the figure is compiled by the authors of this paper): 1, a normal light source; 2, an aerosol chamber; 3, a light receiver with a photo cell; 4, a microammeter for light flow measurements

Поскольку все члены этих зависимостей, а именно – яркость фона, объекта и аэрозольного облака (не обладающего собственным излучением в абсолютной темноте) изменяются во столько же раз, то есть величина контрастности сохраняется, что отражает и уравнение Ламберта-Бера относительно доли пропускаемого света [4]. Другое дело, что при значительном снижении освещенности, например, вечером, распознавание объектов и без аэрозоля снижается, но это качество зрительного восприятия, а не влияние маскировки.

Для доказательства давнего существования иных подходов на маскировку аэрозолями с позиции срытия пространства и искажения световых лучей уместно привести цитату из источника [7, стр. 304], где проводится анализ результатов работы Ватсона и Киблера (Эджвудский арсенал), которые определяли «затемнение» аэрозолем маскируемой площади с учетом суммарной поперечной площади частиц (аналогично нашему подходу в статье [3]). Вывод авторов теории яркости категоричен: «Несмотря на свою заманчивость и, казалось бы, относительно хорошее совпадение эксперимента с теорией, предложения Киблера и Ватсона, несомненно, порочны». Также решительно отвергались и взгляды отечественных оппонентов теории яркости: «Часто приходится встречаться с представлением о том, что маскирующее действие дымов и туманов заключается в задержке или изменении направления прямых лучей от предмета к наблюдателю». Исходя из приведенных нами аргументов можно констатировать, что ранее высказанные, и правильные, по-нашему мнению, взгляды на маскировку аэрозолями были незаслуженно преданы забвению на официальном уровне почти на столетие.

Исходя из представленной нами логики формирования величин скрытия и искажения объекта и фона, определяющих маскировку (4)–(6) при прохождении света через аэрозольное облако (АО), можно выполнить графическое отображение этих функций на рисунке 2.

Таким образом, в соответствии с предлагаемым нами подходом оценки маскировки, основой ее является скрытие объекта и фона, которая эквивалентна для прозрачного и черного аэрозоля, но для прозрачного дополняется искажением, которое визуально сопровождается свечением, поскольку прозрачный аэрозоль, пропуская сквозь себя световые

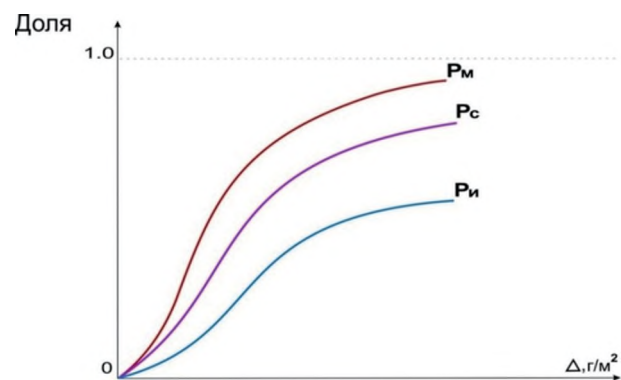


Рисунок 2 – Изменение вероятности скрытия (P_c), искажения (P_d) и суммарной вероятности маскировки (P_m) прозрачным аэрозолем от плотности потока аэрозоля, г/м^2 (рисунок авторов)

Figure 2: The dependence of probability for concealment (P_c), distortion (P_d) and total masking probability from aerosol flow density (P_m), g/m^2 , when we speak about transparent aerosol masking (the figure is compiled by the authors of this paper)

лучи, часть из них одновременно рассеивает во все стороны.

Любая теория нуждается в необходимости ее практического подтверждения. В этой связи предлагается экспериментальный метод определения долей прямых и искаженных квантов, не задевших частицы аэрозоля, а также отраженных и преломленных при взаимодействии с частицами. Для этого необходимо использовать свойство поляризованного света: сохраняющего направление электрической и магнитной составляющих при свободном прохождении в пространстве, и изменяющего плоскость поляризации при встрече с прозрачными частицами аэрозоля¹ [8]. Наиболее простой способ получения поляризованного света – использование дифракционного решетки.

Поляризованный свет позволяет прогнозировать или определить изменение направления кванта, в зависимости от угла падения на сферическую частицу аэрозоля по отношению к нормали в точке встречи. Результат: отражение или преломление кванта определяется законом Брюстера, который применим к разделам фаз между конкретной жидкостью и воздухом, и наиболее изучен по отношению к воде. Для нахождения этого закона для аэрозолеобразующих составов (АОС) необходимо использовать поляризованный свет, направляя его на поверхность раздела фаз «воздух–АОС», изменяя угол падения с

¹ Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. Санкт-Петербург; 2000. 167 с.

одновременным поворотом направления поляризации относительно оси. В результате эксперимента необходимо получить критические значения угла падения поляризованного света и направления плоскости поляризации относительно плоскости АОС, когда наблюдается переход от преломления к отражению (и наоборот). Но можно использовать и эксперимент, который обеспечит измерение суммарного потока искаженного света с разными углами преломления и отражения. Для количественной экспериментальной оценки долей прямых и искаженных световых потоков поляризованного света после взаимодействия с аэрозолем предлагается использовать установку, которая включает элементы, показанные на рисунке 3 [7]:

обычный источник света (п. 1) с линзами (на рисунке 3 не показаны) для достижения изотропности пучка света;

– дифракционная решетка (п. 2), преобразующая обычный свет в поляризованный для облучения аэрозольной камеры (п. 3);

– светоприемник (п. 4), оснащенный подвижным окуляром с открытым сектором и углом α (кратным 360°), также оснащенный дифракционной решеткой, с направлением поляризации по центральному радиусу измерительного сектора (рисунк 4);

– фотоэлемент (п. 5) приемного устройства, соединенный с микроамперметром (6) для измерения фотопотока в люменах ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{ср})$).

При прохождении квантов через аэрозоль, часть из них (не задевшая частицы), сохранит вертикальную плоскость поляризации. Другая часть после неоднократного преломления и отражения изменит начальную плоскость поляризации.

Цель эксперимента – определение доли прямых и искаженных световых потоков на основе анализа их поляризации (сохранения или ее изменения), определяющих вероятности скрытия и искажения объекта (фона), после прохождения света через АК (аэрозольную камеру). Значение поляризованного светопотока после первой дифракционной решетки перед АК обозначим как I_0 (рисунк 3).

Подчеркнем, что вместо величины светового потока (люмены) можно использовать значения величины электрического тока (миллиамперы), если применяемый измерительный прибор проградуирован в относительных значениях света. Понятно, что при этом удобнее работать с прямо пропорциональной их зависимостью, что достижимо при небольших значениях светового потока.

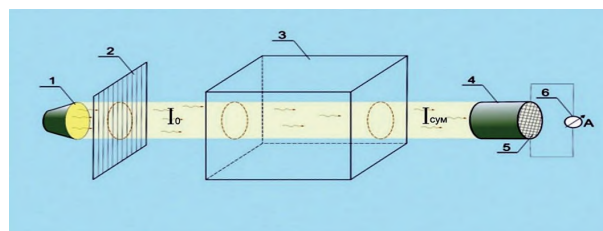


Рисунок 3 – Схема установки для экспериментального установления вероятности скрытия и искажения объектов прозрачными аэрозолями с использованием поляризованного света (рисунк авторов): 1 – источник обычного света; 2 – поляризатор (дифракционная решетка); 3 – аэрозольная камера; 4 – приемник света с поляризационной решеткой (два противоположающихся сектора с углом α); 5 – фотоэлемент с микроамперметром (6)

Figure 3: Layout of facility that is aimed at finding out experimental probability for concealment and distortion of objects with transparent aerosols with polarized light (the figure is compiled by the authors of this paper): 1, a normal light source; 2, a polarizer (a diffraction grating); 3, an aerosol chamber; 4, a light receiver with a polarized grating (two opposite segments with α angle); 5, a photo cell with a microammeter (6)

Сущность эксперимента на предлагаемой установке заключается в том, чтобы осуществить замер светопотока при каждом изменении положения приемного сектора α при полном обороте (два пи), последовательно поворачивая приемный окуляр на шаг α , рисунок 4. При каждом повороте приемного устройства измеряется величина светопотока $I_i(\alpha)$. При этом необходимо зафиксировать результаты и выполнить математическую обработку измерений. Сущность математической обработки заключается в следующем:

каждому сектору с порядковым номером i соответствует сумма потоков света после АК, совпадающая с направленностью центрального радиуса данного сектора и вклада световых потоков, совпадающих по полярности с соседними секторами. При выбранной нами начальной вертикальной полярности света (от первой дифракционной решетки), световой поток, не задевший частицы аэрозоля, при первом измерении (сектором 1 и 7) проходит через второй поляризатор без уменьшения своей величины. Но кроме света, совпадающего по полярности с первым измерительным сектором, в него попадают световые потоки (взаимодействовавшие с частицами аэрозоля), совпадающие с направлением соседних секторов (по центральному их радиусу), при этом величина их вклада в общий измеренный световой поток сектора



Рисунок 4 – Схема поляризационного фотоприемного окна светового потока после аэрозольной камеры (рисунок авторов)

Figure 4: A layout of a polarized photo-receiving slot of a light flow after an aerosol chamber (the figure is compiled by the authors of this paper)

измерения определяется известным законом Малюса [6], рисунок 5. Эти рассуждения применимы и к другим секторам: i -ый сектор «принимает» без снижения величины свет, совпадающий с направлением собственной полярности, и снижает световые потоки, совпадающие по направлению соседних секторов по закону Малюса. Отметим, что аргументом для функции Малюса, в данном примере, является угол, кратный ($j \alpha$), где j – номер шага, отсчитываемый вправо-влево от угла измерения.

Обозначим нумерацию секторов следующим образом (при условии: α равно 30°). Первый измерительный сектор от -15° до $+15^\circ$. Далее по часовой стрелке: 2, 3 и т. д. по 12 включительно, рисунок 6.

При осуществлении измерений светового потока последовательно с первого сектора можно обозначить полученные результаты как: $I_1^{\text{изм}}, I_2^{\text{изм}}, I_3^{\text{изм}}, I_4^{\text{изм}}, I_{11}^{\text{изм}}, I_{12}^{\text{изм}}$.

При этом следует понимать, что светоприемный окуляр первого сектора «работает» или осуществляет измерения попарно с сектором № 7; 2 с 8; 3 с 9; 4 с 10; 12 с 6; 11 с 5, что в сумме составит 6 измерений. Составим систему из шести линейных уравнений (10), в которой учитывается эффект сложения световых потоков собственного направления и вклада пяти соседних направлений по формуле Малюса – $F_{(j \times 30)}$. Система включает шесть неизвестных: величина светового потока, соответствующая направленности центрального радиуса каждого i -го сектора – I_i (ист), рисунок 6. Отметим, что I_1 (ист) первого сектора соответствует лучам, не задевшим частицы аэрозоля, то есть прямому свету, значение которого позволяет определить вероятность скрытия по предложенной ранее зависимости:

$$\begin{aligned} I_1^{\text{изм}} &= I_1(\text{ист}) + I_2(\text{ист}) \times F(30) + I_3(\text{ист}) \times F(60) + I_4(\text{ист}) \times F(90) + I_{12}(\text{ист}) \times F(30) + I_{11}(\text{ист}) \times F(60) \\ I_2^{\text{изм}} &= I_2(\text{ист}) + I_3(\text{ист}) \times F(30) + I_4(\text{ист}) \times F(60) + I_{11}(\text{ист}) \times F(90) + I_{12}(\text{ист}) \times F(60) + I_1(\text{ист}) \times F(30) \\ I_{11}^{\text{изм}} &= I_{11}(\text{ист}) + I_{12}(\text{ист}) \times F(30) + I_1(\text{ист}) \times F(60) + I_2(\text{ист}) \times F(90) + I_4(\text{ист}) \times F(30) + I_3(\text{ист}) \times F(60), \end{aligned} \quad (10)$$

где: I_1 (ист) – I_{11} (ист) истинное значение светопотока, соответствующее данному сектору

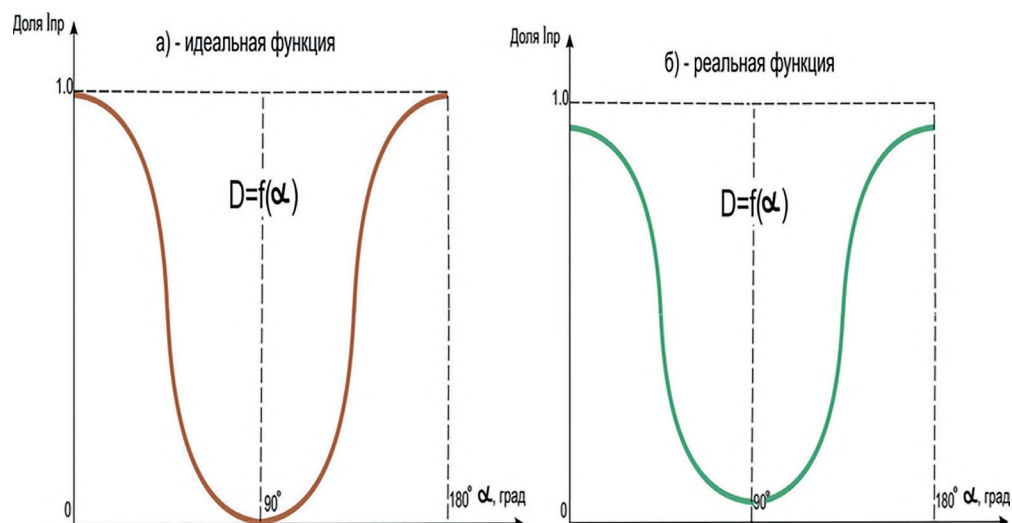


Рисунок 5 – Зависимость доли пропускания поляризованного света под разными углами α (функция Малюса, $\cos^2 \alpha$) (рисунок авторов)

Figure 5: The dependence of polarized light transmission value from angle α measures (Malus function, $\cos^2 \alpha$) (the figure is compiled by the authors of this paper)

емого для освещения АК. Для этого каждая из ДР (поочередно), устанавливается после источника света (без АК или при «пустом» АК без аэрозоля) и измеряется величина снижения светового потока за счет ДР по отношению к свету без ДР. Этот показатель для идеальной ДР должен быть равным двум, реальная решетка может иметь несколько большее значение. При повороте одной решетки на любой угол эта величина не должна существенно меняться (в пределах погрешности измерений), что подтвердит изотропность источника света.

2. Оценка взаимодействия двух решеток. Фиксируется первая ДР (после источника света) в стабильном положении, например, в вертикальном. Осуществляется проверка пропускания света второй решеткой после первой (без аэрозоля) при параллельном их положении и перпендикулярном. В первом случае величина светового потока должна остаться практически прежней (с небольшим уменьшением), во втором, снизиться почти до нуля. Реальные цифры будут несколько отличаться, например, эти показатели будут равными $X_{\text{пар}} = 0,95$ и $X_{\text{пер}} = 0,05$. Зафиксировать полученные показатели. Отношение световых потоков $X_{\text{пар}}/X_{\text{пер}}$ (0,95/0,05), равное 19, – опорное.

Примечание: наличие АК даже без аэрозоля окажет влияние на некоторое изменение полярности начального светового потока за счет его взаимодействия со стеклом АК. На выходе из АК направление полярности изменится на малый угол «бета». Эту величину, зависящую от толщины прозрачных стенок АК можно определить приемной решеткой, которая даст максимальное снижение величины светового потока не при 90° относительно исходного направления поляризации, а при 90° плюс «бета».

3. Проверка изменения доли прямого света и искаженного при ступенчатом повышении концентрации аэрозоля в АК. В соответствии с предлагаемой теорией при возрастании концентрации аэрозоля (соответственно и интегральной концентрации) в АК, при проведении измерений величины света приемным устройством, должна снижаться доля прямого света (за счет скрывания пространства) и возрастать доля искаженного при одновременном снижении величины светового потока в целом при каждом измерении.

Порядок измерений

3.1. Для иллюстративности теории необходимо отрегулировать порядок скачкообразного повышения концентраций аэрозоля. При наличии трехгранной камеры, представленной в патенте [2], наверное, будет доста-

точно 3 «скачков» или уровней плотности потока от 0,3 до 3 г/м²: 0,3; 1,0; 3,0 г/м².

3.2. На каждом уровне провести измерения при удвоении длины аэрозоля в камере по линии визирования. На каждом уровне концентраций вначале замеряется величина света фотометром на короткой трассе при параллельном положении ДР, а потом – при перпендикулярном. Аналогично на удвоенной длине трассы. Необходимо при каждом положении ДР увеличивать исходную величину света (лучше вдвое) посредством, например, реостата в сети подачи тока на источник света. Изменение величины светового потока не должно оказывать влияния на соотношение долей измеряемого света при параллельном и перпендикулярном положении ДР в пределах погрешности измерений. Например, первый замер показал величину света при параллельном положении ДР – 0,05 А, при перпендикулярном – 0,01 А. Увеличение светового потока вдвое (за счет реостата) должно обусловить примерное удвоение этих показателей. Это будет означать, что начальная величина освещенности АК не оказывает влияние на соотношение долей прямого и искаженного света, то есть на маскировку при неизменности всех других исходных условий.

3.3. Динамика изменения величины светового потока. В соответствии с теорией, при скачкообразном возрастании концентраций в АК должно изменяться соотношение световых потоков (прямых и искаженных). Отношение величины электрических токов (отражающих величину света) при параллельном и перпендикулярном положении решеток при постепенном увеличении концентрации аэрозоля ($X_{\text{пар}}/X_{\text{пер}}$) должно снижаться. В пределе при высоких значениях плотности потока это отношение будет приближаться к единице. Это будет означать, что почти весь поляризованный свет за счет преломления и отражения на частицах аэрозоля изменил свою полярность практически равномерно «по кругу», и достигнуто полное скрывание пространства. С этого момента повышение плотности потока может приводить к снижению яркости аэрозоля (вместо прежнего роста), но качество маскировки не изменится (достигнут предел). Повышение освещенности АК не должно менять это отношение.

Самый простой способ проверки наличия прямых и искаженных лучей без АК

Взять полупрозрачное молочное стекло, источник света и две ДР. Молочное стекло – вместо АК. При этом при визуальной про-

верке через это стекло не должна просматриваться картина при обычной освещенности.

При отсутствии стекла поворот приемной ДР на 90° даст максимальное снижение фототока (кратность). Если установить между ДР молочное стекло, то поворот приемной ДР не должен менять кратность снижения фототока (показания микроамперметра). Это значит, что прямых лучей нет, все лучи искажены и распределены равномерно по кругу. Увеличение освещенности (силы света) ничего не изменит, отношение величины токов светоприемника при полной маскировке не должно меняться в пределах погрешности измерений.

Выводы

1. В качестве основных параметров маскировки объектов аэрозолями необходимо использовать величину доли скрытия пространства частицами аэрозоля для наблюдателя (оптического прибора) и долю искаженного светового потока, кванты которого после встречи с прозрачными частицами поменяли первоначальное направление распространения от объекта и проецируются на

другие, а не исходные точки наблюдаемого объекта и фона. Сумма этих вероятностных независимых событий и является итоговой величиной вероятности маскировки.

2. Для экспериментального установления вероятности скрытия и искажения объектов прозрачными аэрозолями может быть использована экспериментальная установка на основе традиционной аэрозольной камеры и двух дифракционных решеток: первая для получения начального источника плоско поляризованного света, вторая – в качестве приемного устройства в виде подвижных противолежащих секторов, предназначенная для измерения величины света при каждом дискретном повороте в пределах полного поворота измерительного устройства на 360 градусов.

3. Разработан математический аппарат обработки результатов измерений, для получения параметров маскировки, исходя из доли скрытия пространства аэрозолем и искажения наблюдаемой (регистрируемой) картины прозрачным аэрозолем вследствие изменения первоначального направления доли светового потока от объекта и фона.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Обусловлены исходными данными: дисперсность частиц аэрозоля 1–10 мкм, плотность потока (интегральная концентрация) – 0,1–10 г/м², видимый диапазон ЭМИ спектра облучения аэрозольной камеры. / The limitations of the study are stipulated by the raw data: dispersion of aerosol particles 1–10 μm, flow density (integral concentration) – 0,1–10 g/m², visible range of electromagnetic impulse radiation spectrum of aerosol chamber.

Список источников / References

1. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Маскирующие дымы*. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы; 1947. 208 с.
Weitzer YuI, Luchinsky GP. *Disguising Fumes*. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature; 1947. 208 p. (in Russian).
2. Засидателев ВБ, Козлов СА, Болотов АВ, Решетник АС, Тучин НА, Болсуновский СВ. Способ определения маскирующих характеристик аэрозолей. Патент RU 2 376 583 C2 от 20.12.2009 г.
Zaitsev VB, Kozlov SA, Bolotov AV, Reshetnikov AS, Tuchin NA, Bolsunovsky SV. A method for determining the masking characteristics of aerosols. The Patent RU 2 376 583 C2. 20.12.2009 (in Russian).
3. Колесников ДП, Пенязь ВН, Голышев МА, Буряк ДН, Артамонов ИВ. Влияние дисперсности аэрозоля на его маскирующую способность. *Вестник войск РХБ защиты*. 2021;5(3):260–8.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
Kolesnikov DP, Penyaz VN, Golyshev MA, Buryak DN, Artamonov IV. Effect of Aerosol Dispersion on Its Masking Ability. *Journal of NBC Protection Corps*. 2021;5(3):260–8 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
4. Брусенин АА, Красильников СА, Пенязь ВН, Буряк ДН, Артамонов ИВ, Бурков ВД. Аналитическая зависимость вероятности маскировки объектов от плотности и дисперсности аэрозоля. *Вестник войск РХБ защиты*. 2023;7(1):53–61.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
Brusenin AA, Krasilnikov SA, Penyaz VN, Buryak DN, Artamonov IV, Burkov VD. Analytical Dependence of the Probability of Masking Objects on the Density and Dispersion of the Aerosol. *Journal of NBC Protection Corps*. 2023;7(1):53–61 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>

5. Брусенин АА, Буряк ДН, Пенязь ВН, Артамонов ИВ. Оценка структуры свободного пространства в аэрозольном облаке. *Вестник войск РХБ защиты*. 2024;8(2):176–84.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2024-8-2-176-184>

Brusenin AA, Buryak DN, Penyaz VN, Artamonov IV. Estimation of the Structure of Free Space in an Aerosol Cloud. *Journal of NBC Protection Corps*. 2024;8(2):176–84 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2024-8-2-176-184>

6. Брусенин АА, Голышев МА, Пенязь ВН, Буряк ДН, Артамонов ИВ, Полякова ГЮ. Способ количественной оценки маскирующей способности аэрозоля и установка для его осуществления. Патент № 2814453 от 26.02.2024 г.

Brusentsov AA, Golyshev MA, Prince VN, Buryak DN, Artamonov IV, Polyakova GYu. A Method for Quantifying the Masking Ability of an Aerosol and an Installation for its Implementation. The Patent № 2814453. 26.02.2024 (in Russian).

7. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Химия и физика маскирующих дымов*. Ленинград: Государственное издательство оборонной промышленности; 1938. 203 с.

Weitzer YI, Luchinsky GP. *Chemistry and Physics of Masking Fumes*. The State Leningrad: Publishing House of the Defense Industry; 1938. 203 p. (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contributions

А.А. Брусенин – редактирование статьи. **В.Н. Пенязь** – постановка задачи, написание начального варианта статьи. **Д.Н. Буряк** – поиск научной литературы и работа с первоисточниками. **И.В. Артамонов** – разработка иллюстративного материала, оформление статьи в соответствии с редакционными требованиями. **Д.С. Горбачев** – математическая модель обработки результатов эксперимента. / **A.A. Brusenin** has edited the article. **V.N. Penjaz'** has formulated the concept of the study, has written the initial draft of the article. **D.N. Buryak** has searched for academic sources, has analyzed the material. **I.V. Artamonov** has made illustrations, has complied with the requirements to the article. **D.S. Gorbachev** has created a mathematical pattern for experiment results processing.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Брусенин Альберт Александрович. Начальник научно-исследовательского отдела, канд. техн. наук.

Пенязь Владимир Николаевич. Старший научный сотрудник отдела, канд. техн. наук, почетный работник науки и техники РФ.

Буряк Дмитрий Николаевич. Научный сотрудник отдела.

Артамонов Илья Валерьевич. Научный сотрудник отдела.

Горбачев Дмитрий Сергеевич. Научный сотрудник отдела.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l2@mil.ru

Контактное лицо: Брусенин Альберт Александрович; 27nc_l2@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Albert A. Brusenin. Head of the Research Department, Cand. Sci. (Techn.).

Vladimir N. Penjaz'. Senior Researcher of the Department, Cand. Sci. (Techn.), Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation.

Dmitry N. Buryak. Research associate of the department.

Ilya V. Artamonov. Research associate of the department.

Dmitry S. Gorbachev. Research associate of the department.

Contact information for all authors: 27nc_l2@mil.ru

Contact person: Albert A. Brusenin; 27nc_l2@mil.ru



Методы и средства исследования микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозольных образований для снижения заметности

В.Д. Иванов✉, В.П. Хантов, Р.С. Лошманов

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации
156013, Российская Федерация, Костромская область, г. Кострома, ул. Горького, д. 16
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Основные моменты

- Определение геометрических параметров, количественной концентрации и статистического распределения частиц в аэрозольных завесах позволяет оптимизировать влияние микрофизических характеристик дисперсной фазы (ДФ) специальных маскирующих аэрозолей, применяемых для скрытия военных объектов и техники.

- Достоверный контроль дисперсного состава частиц ДФ обеспечивается комплексным применением прямых и косвенных методов диагностики с различной чувствительностью, что критически важно для оценки эффективности маскировочных комплексов.

Актуальность. Разнообразие методов исследования микрофизических характеристик аэрозолей и технических средств их реализации затрудняет выбор тех из них, которые позволяют получить полные сведения о характеристиках ДФ.

Цель работы – выбор методов и средств исследований микрофизических характеристик ДФ аэрозолей искусственного происхождения, которые могут использоваться для снижения заметности.

Источниковая база исследования. Научная и техническая литература, доступная через глобальную сеть Интернет.

Метод исследования. Аналитический.

Результаты. Предложены оригинальные классификации основных микрофизических параметров ДФ аэрозоля, разделенных на три основные группы (статические, динамические и электрические параметры), и методов дисперсного анализа аэрозолей на основе представлений о прямых и косвенных измерениях, рассмотрены особенности измерений размерных параметров частиц ДФ, методы и технические средства дисперсного анализа. Определена применимость этих методов для исследований аэрозольных образований для снижения заметности.

Заключение. Для анализа аэрозольных маскирующих средств, предназначенных для снижения заметности, рекомендуется комбинированный подход с использованием как прямых, так и косвенных методов измерений. Это включает статический анализ изображений и лазерный дифракционный анализ. Минимальный, но достаточный набор методик измерений – с учетом конструктивных ограничений аппаратуры – должен включать: фазово-разделительную фильтрацию (аспирационный отбор проб частиц); гравиметрический анализ (высокоточные лабораторные весы); статический анализ изображений (оптическая микроскопия со специализированным ПО для анализа дисперсности); лазерный дифракционный анализ (конфигурация с пространственно разнесенным и излучателем и приемником для повышения разрешающей способности).

Ключевые слова: аэрозоль; дисперсный анализ; диаметр частицы; дисперсный состав; дисперсная фаза; распределение частиц по размеру; средства снижения заметности

Для цитирования: Иванов В.Д., Хантов В.П., Лошманов Р.С. Методы и средства исследования микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозольных образований для снижения заметности. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):240–262. EDN:uvygr.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-240-262>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации.

Поступила 25.07.2024 г. После доработки 12.03.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Methods and tools of researching some microphysical features of disperse phase of reducing visibility aerosols

Vladimir D. Ivanov✉, Vyacheslav P. Khantov, Roman S. Loshmanov

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union
S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation
16, Gorky Street, Kostroma 156015, Russian Federation
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Highlights

- Measuring the shape, size, particle concentration, and statistical distribution within an aerosol formation allows for the optimization of influence from the microphysical properties of the dispersed phase (DP) in aerosol obscuration.
- The reliability of particle dispersion analysis results for the DP can be achieved through the simultaneous or sequential application of various direct and indirect measurement methods, including those with different sensitivity thresholds.

Relevance. The variety of methods for studying the microphysical characteristics of aerosols and the technical means of their implementation complicates the selection of those that provide comprehensive data on DP characteristics.

Purpose of the study is to select methods and means for studying the microphysical characteristics of artificially generated aerosol DP that can be used for signature reduction.

Study base sources. Scientific and technical literature, including sources available via the global Internet.

Method. Analytical.

Results. Original classifications of the main microphysical parameters of aerosol DP were proposed, divided into three main groups (static, dynamic, and electrical parameters), along with methods for aerosol dispersion analysis based on direct and indirect measurement principles. The specifics of measuring particle size parameters, as well as methods and technical means for dispersion analysis, were examined. The applicability of these methods for studying aerosol formations in signature reduction applications was determined.

Conclusions. For the study of aerosol formations intended for signature reduction, the combined use of direct and indirect measurement methods is advisable, including static image analysis and laser diffraction analysis. Among these, a minimal set of direct and indirect measurement methods – accounting for the design features of the implementing hardware – may consist of: Phase-separation filtration (aspirator); Weighing (special-class laboratory scales); Static image analysis (microscope with software for image dispersion analysis), and; Laser diffraction analysis (in a configuration with spatially separated emitters and receivers).

Keywords: aerosol; disperse analysis; dispersed composition; disperse phase; particle diameter; particle size distribution; tools for reducing visibility

For citation: Ivanov V.D., Khantov V.P., Loshmanov R.S. Methods and tools of researching some microphysical features of disperse phase of reducing visibility aerosols. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):240–262. EDN:uvygr. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-240-262>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Received 25 July 2024. Revised 12 March 2025. Accepted 27 September 2025.

Исторически первым и одним из самых распространенных способов снижения заметности является применение дымов, являющихся одной из разновидностей аэрозольных образований. Механизмы формирования и постановки аэрозольных завес изучаются на протяжении длительного времени. В последнее время проводятся также работы по математическому моделированию влияния размеров частиц и структуры аэрозолей на их маскирующую способность [1, 2]. Однако экспериментальных исследований, связанных с изучением микрофизических, в том числе морфологических, свойств аэрозольных образований для снижения заметности проводилось сравнительно немного.

Цель работы – провести анализ методов и средств исследований микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозолей искусственного происхождения, которые могут использоваться для снижения заметности и выбор наиболее подходящих из них для проведения перспективных исследований в этом направлении.

Источниковая база исследования. Научная и техническая литература, в том числе доступная через глобальную сеть Интернет.

Метод исследования. Аналитический.

Для достижения цели работы нами:

- изучено современное состояние исследований свойств аэрозолей;
- проведен обзор методов и средств исследований микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозолей;
- проанализированы достоинства и недостатки как самих методов, так и доступных в настоящее время технических средств их реализации;
- определены методы, наиболее подходящие для исследований микрофизических характеристик аэрозольных образований для снижения заметности военных объектов.

Современное состояние исследований свойств аэрозолей

В соответствии с общепринятой терминологией под аэрозолями понимаются дисперсные системы с газообразной непре-

рывной средой и с твердой или жидкой дисперсной фазой [3].

Существуют различные способы классификации аэрозолей. Некоторые зарубежные авторы, например, П. Райст [4] под пылью понимают аэрозоли с твердыми частицами, образующимися в процессе измельчения; под туманами – аэрозоли с твердыми частицами, образующимися в результате физико-химических процессов, таких как горение, сублимация или дистилляция; под дымом – аэрозоли с частицами, образующимися при некоторых процессах окисления, например горения, под смогом – смесь тумана и дыма. При этом автор признает, что эти определения взяты из повседневной жизни, поэтому в предлагаемых им классификационных признаках встречаются некоторые совпадения.

В отечественной практике чаще применяется несколько иная классификация. Аэрозоли с жидкими частицами дисперсной фазы (ДФ), образующимися при конденсации и распылении, независимо от их размера называются туманом. Аэрозоли с твердыми частицами ДФ, образующимися в результате механического измельчения твердых тел – пылью. Аэрозоли, которые не могут быть отнесены ни к пыли, ни к туману, и могут содержать как твердые, так и жидкие частицы ДФ – дымами [3]. Похожей классификации придерживаются также специалисты британской военно-химической службы Х. Грин и В. Лейн [5]. Фактически все классификации аэрозолей основаны на различии свойств ДФ, оказывающих основное влияние на свойства аэродисперсной системы в целом. Следует отметить, что для целей снижения заметности наибольший практический интерес с учетом приведенной классификации представляют дымы и туманы.

До сих пор одним из основных отечественных источников, содержащих наиболее полные сведения о микрофизических свойствах ДФ аэрозольных образований для снижения заметности, остается книга Ю.И. Вейцера и Г.П. Лучинского [6], изданная в 1947 году. Остальные работы в этой области, например [7], явно заимствуют эти сведения.

В то же время исследования аэрозольных образований, в том числе микрофизических свойств ДФ, широко проводятся в других областях знаний. Большое количество исследований относится к изучению атмосферных аэрозолей [8–15]. Также публикуется много работ, связанных с промышленными аэрозолями, которые образуются в результате технологической деятельности, особенно в связи с развитием производства микроэлектроники и других отраслей промышленности, требующих применение сверхчистых помещений [16–21]. Изучение микрофизических свойств аэрозолей осуществляется также при разработке, производстве и применении медицинских препаратов в аэрозольной форме [22–25] и в противопожарных целях [26]. Результаты, полученные в этих областях знаний, в той или иной степени могут быть использованы при исследованиях аэрозольных образований для снижения заметности.

Микрофизические свойства дисперсной фазы аэрозолей

Свойства аэрозолей, можно условно разделить на макрофизические, описывающие состояние аэродисперсной системы в целом, и определяющие это состояние микрофизические свойства дисперсной фазы и газовой среды. При этом следует учитывать, что между всеми микрофизическими свойствами существуют определенные функциональные взаимосвязи, которые также оказывают влияние на состояние системы.

Поскольку в большинстве случаев газовой средой является атмосферный воздух, предполагается, что наиболее существенное влияние на свойства аэрозолей оказывают параметры ДФ. Обзорная схема основных микрофизических параметров ДФ приведена на рисунке 1. В нее включены укрупненные характеристики без указания взаимосвязей между ними. Например, размер частицы может быть представлен одним числовым значением только для сферических частиц идеальной формы. Для частиц произвольной формы, отличной от сферической, обычно учитываются дополнительные параметры, описывающие форму частицы или учитывающие отклонение от сферической формы. Таким образом, размер частиц, выражаемый одним числом, является укрупненным параметром, имеющий взаимосвязь с формой и

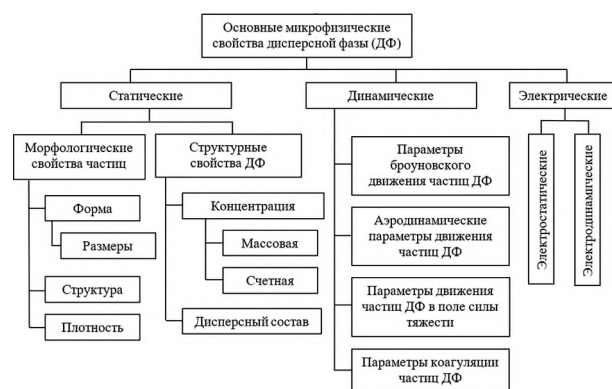


Рисунок 1 – Основные микрофизические параметры дисперсной фазы аэрозолей (рисунок авторов)

Figure 1: The main microphysical parameters of the dispersed phase of aerosols (the authors' drawing)

остальными размерами частицы. Структура частицы, образованной в результате коагуляции, определяет ее размеры и форму, а также может оказывать влияние на кажущуюся плотность, аэродинамические и электрические свойства частицы.

Из представленной схемы видно, что количество только основных укрупненных свойств дисперсной фазы достаточно велико. Доскональное описание каждого из них и методов их исследования является весьма обширной задачей, поэтому в данной статье предполагается рассмотреть лишь некоторые из этих свойств: форму и размеры частиц, обычно относимые к морфологическим свойствам ДФ [4], а также концентрацию и распределение частиц по размерам, определяющие структуру ДФ. Выбор именно этих параметров объясняется их наиболее значимым влиянием непосредственно на маскирующие свойства аэрозолей, которые определяются, в первую очередь, взаимодействием электромагнитного излучения (ЭМИ) в видимом, инфракрасном и радиочастотном диапазонах с частицами ДФ, существенно зависящего от размеров и количества частиц. Рассмотрению взаимодействия ЭМИ с частицами ДФ также посвящено достаточно много исследований [27–31].

Определение размера частиц, концентрации частиц и распределения их по размерам часто называют дисперсным анализом¹.

¹ Соответствует определению в ГОСТ Р 51109–97 Промышленная чистота. Термины и определения, но не соответствует определению в ГОСТ 8.961–2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсные характеристики аэрозолей и взвесей. Термины и определения, в котором под дисперсным анализом понимается анализ изменчивости дисперсных характеристик под влиянием каких-либо контролируемых переменных факторов.

Размеры частиц дисперсной фазы

При определении системы размерных параметров частиц произвольной формы стремятся к минимальному количеству числовых значений, достаточно полно описывающих их размеры для конкретного применения, желательно – к одному. Из всех возможных пространственных форм частиц только сфера может быть однозначно описана единственным числовым значением (диаметром). Однако близкую к идеальной сферическую форму в большинстве случаев имеют только частицы жидкости [4], частицы в твердой фазе такую форму имеют редко (рисунк 2).

В случае наличия в аэрозоле твердых частиц несферической формы определение их размеров становится значительно более сложной задачей. Размеры частиц неправильной формы в идеале должны описываться массивом числовых значений. Описание размерных параметров частицы более чем одним числовым значением несоразмерно усложняет описание структуры и поведения всего ансамбля частиц, что делает крайне неудобным его дальнейшее применение.

В большинстве практически важных случаев нет необходимости описывать размерные параметры частицы тремя или более числовыми значениями, за исключением случаев, когда форма частиц имеет принципиальное значение. Таким образом, основной задачей при анализе размеров частиц ДФ является корректное нормирование размера трехмерного объекта произвольной формы одним числовым значением.

Решению этой задачи способствует то, что при исследовании некоторых свойств частиц можно предположить, что частица ведет себя как сфера с определенным диаметром (радиусом), который может быть выражен одним числовым значением. Такими свойствами могут быть рассеяние света, скорость оседания частиц и некоторые другие.

Подобное приведение размерной системы частицы к одному числовому значению по-

лучило название теории «эквивалентных» диаметров, суть которой заключается в сопоставлении некоторого свойства частицы произвольной формы к равному по значению аналогичному свойству сферы определенного диаметра. С этой целью были предложены различные «эквивалентные» диаметры, некоторые из которых приведены в таблице 1 [4, 5, 33]. В разных литературных источниках эти параметры могут иметь несколько отличные наименования, например, «проекции-онный диаметр» [5] в работах [4, 33] именуется «диаметр проектируемой поверхности», «оптический диаметр», в работе [34] «диаметром Ми» и «эквивалентным диаметром по рассеянию света». Однако физическая сущность всех перечисленных параметров совпадает.

Достаточно подробный обзор и анализ размерных параметров приведен в работе [35].

Очевидно, что ни один из «эквивалентных» диаметров не может достаточно полно описать совокупность размерных характеристик частицы существенно несферической формы, которые вместе или по отдельности оказывают влияние на свойства аэродисперсной системы в целом. Разные «эквивалентные» диаметры одной и той же частицы, полученные разными методами, будут отличаться количественно (рисунк 3). Поэтому все «эквивалентные» параметры имеют ограниченное применение и подходят только для определенных случаев поведения аэродисперсной системы и метода измерения этих параметров.

Следует также учитывать, что результаты измерений линейных размеров частицы произвольной формы могут существенно зависеть от ее ориентации относительно плоскости измерений. В некоторых случаях за окончательный размер в определенной плоскости измерений принимается усреднение результатов измерений большого числа частиц в узком интервале линейных размеров,

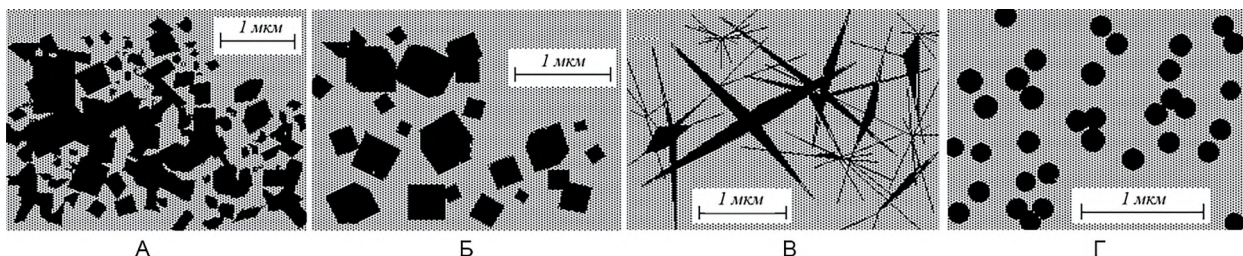


Рисунок 2 – Микроскопические изображения аэрозольных частиц: А – дым окиси магния, Б – дым хлористого натрия, В – дым окиси цинка, Г – монодисперсный аэрозоль селена [32]

Figure 2: Microscopic images of aerosol particles: А, smoke of magnesium oxide; Б, smoke of sodium chloride; В, smoke of zinc oxide; Г, monodisperse aerosol of selenium [32]

Таблица 1 – Некоторые «эквивалентные» диаметры, применяемые для определения размеров частиц
Table 1. Some 'equivalent' diameters used for determining particle sizes

Наименование / Name	Описание / Description
Диаметр Ферета / Feret diameter	Максимальное расстояние между наиболее удаленными краями частицы / Maximum distance between the farthest edges of a particle
Диаметр Мартина / Martin diameter	Длина линии, которая делит частицу на две равные части по площади проекции / Length of the line dividing the particle's projected area into two equal halves
Проекционный диаметр (диаметр Хейвуда) / Projected area diameter (Heywood diameter)	Диаметр круга с площадью, равной площади проекции частицы / Diameter of a circle with an area equal to the particle's projected area
Поверхностный диаметр / Surface diameter	Диаметр сферы с площадью поверхности, равной площади поверхности частицы / Diameter of a sphere with a surface area equal to the particle's surface area
Объемно-поверхностный диаметр / Volume-surface diameter (Sauter mean diameter, SMD)	Величина, полученная делением объема частицы на площадь ее поверхности / Value obtained by dividing the particle's volume by its surface area
Объемный (или массовый) диаметр / Volume diameter (or mass-equivalent diameter)	Диаметр сферы с объемом (массой), равной объему (массе) частицы / Diameter of a sphere with a volume (or mass) equal to the particle's volume (or mass)
Периметрический диаметр / Perimeter diameter	Диаметр окружности, периметр которой равен периметру проекции частицы / Diameter of a circle with a perimeter matching the particle's projected outline perimeter
Стоксовский (седиментационный) диаметр / Stokes diameter (sedimentation diameter)	Диаметр сферы, имеющий скорость оседания, равную скорости оседания частицы (зависит от плотности частицы) / Diameter of a sphere with the same settling velocity as the particle (dependent on particle density)
Аэродинамический диаметр / Aerodynamic diameter	Диаметр сферы плотностью 1 г/см ³ , имеющей такие же аэродинамические показатели, что и частица / Diameter of a sphere with a density of 1 g/cm ³ exhibiting identical aerodynamic behavior to the particle
Оптический диаметр / Optical diameter	Диаметр сферы, имеющей то же сечение рассеяния оптического излучения, как и частица / Diameter of a sphere with the same optical scattering cross-section as the particle
Примечание. Таблица составлена авторами по данным из работ [33–35]. Note. The table was compiled by the authors based on data from [33–35].	



Рисунок 3 – Сравнение некоторых эквивалентных диаметров частицы произвольной формы в схематическом представлении в порядке возрастания [36]. А – Диаметр Мартина (длина хорды, разделяющей проекцию частицы на две части, имеющие равные площади A1 и A2); Б – Диаметр Ферета (расстояние между параллельными линиями, касательными к линии контура проекции частицы); В – Диаметр Хейвуда (диаметр окружности, имеющей ту же площадь, что и проекция частицы)
Figure 3: Comparison of some equivalent diameters of a particle of arbitrary shape in a schematic representation in ascending order [36]. A, Martin diameter (length of the chord dividing the particle into two parts having equal areas A1 and A2); Б, Feret diameter (distance between parallel lines tangent to the contour line of the particle); В, Heywood diameter (diameter of a circle having the same area as the projection of the particle)

исходя из предположения, что ориентация частиц является беспорядочной [33].
Размерные параметры частицы являются одним из наиболее важных факторов определяющих поведение аэрозолей [4].
Следует также отметить, что во многих работах, рассматривающих влияние размерных параметров на состояние и поведение аэродисперсной системы в целом, используется единственное числовое значение размера частиц, но не указывается каким образом оно получено, т.е. каким эквивалентным значением фактической системы размерных параметров частиц оно является. Эти обстоятельства существенно осложняют оценку сопоставимости данных из разных источников.

Концентрация частиц дисперсной фазы
Концентрация частиц ДФ также является одной из важнейших характеристик, от которой зависит поведение дисперсной системы в различных физических и химических процессах. Различают счетную, массовую и объ-

емную концентрации, которые определяются соответственно общим количеством, массой или объемом частиц ДФ в единице объема аэрозоля. Сведения об этих концентрациях позволяют определить среднюю массу частицы, ее плотность и объем.

Распределение частиц по размерам

В подавляющем большинстве случаев аэрозоли состоят из частиц с различающимися размерными параметрами, такие аэрозоли называются полидисперсными.

Иногда полидисперсная система достаточно удовлетворительно характеризуется одним размером частиц. Однако в большинстве случаев необходима более подробная информация о распределении частиц по размерам [4].

Распределение аэрозольных частиц по размерам может быть выражено несколькими способами. В большинстве случаев такие данные представляют в виде линейных диаграмм или гистограмм, наглядно отображающих зависимость числа частиц от интервала их размеров (рисунк 4).

На гистограмме высота каждого прямоугольника соответствует количеству частиц или их доле с размерами которые попадают в интервал, определяемый основанием прямоугольника. Очевидно, что суммарная высота всех прямоугольников гистограммы равна общему числу частиц всех размеров. Стандартизованные интервалы размеров называются также классами размеров.

Распределение частиц по размерам является многокритериальной характеристикой полидисперсной аэрозольной системы, в силу чего, как и в случае с размерными параметрами, его использование в таком виде неудобно для количественного сопоставления таких систем. Поэтому распределение размеров частиц также пытаются описать параметрами, которые могут быть определены единственным числовым значением, так называемыми «средними» значениями. Необходимо иметь в виду, что «средние» значения, определенные различными способами, могут значительно отличаться [3].

Наиболее часто применяются: простое арифметическое или геометрическое усреднение размеров всех частиц в выборке (среднее арифметическое, среднее геометрическое значения); медианные средние значения, которые делят выборку на две равные части, т.е. являются точкой на кривой распределения, слева и справа от которой находится по 50 % общего количества частиц; средние моды, определяемые значением максимума кривой распределения. Для нормального распределения среднее арифметическое, мода и медиана совпадают, для других распределений эти значения могут существенно отличаться [37, 38].

Для правильного выбора метода измерений размеров частиц и их распределения, необходимо также учитывать некоторые другие микрофизические характеристики, которые могут оказывать существенное влияние на результаты измерений, такие как структура (внутреннее строение) частицы, поверхностные свойства частицы (свойства поверхности раздела в аэрозольной среде) и структурная однородность частиц в аэрозоле.

Структура частиц дисперсной фазы

Плотность частиц зависит от природы исходного вещества, из которого они образованы. Кроме того, аэрозольные частицы могут объединяться в агломераты, которые,

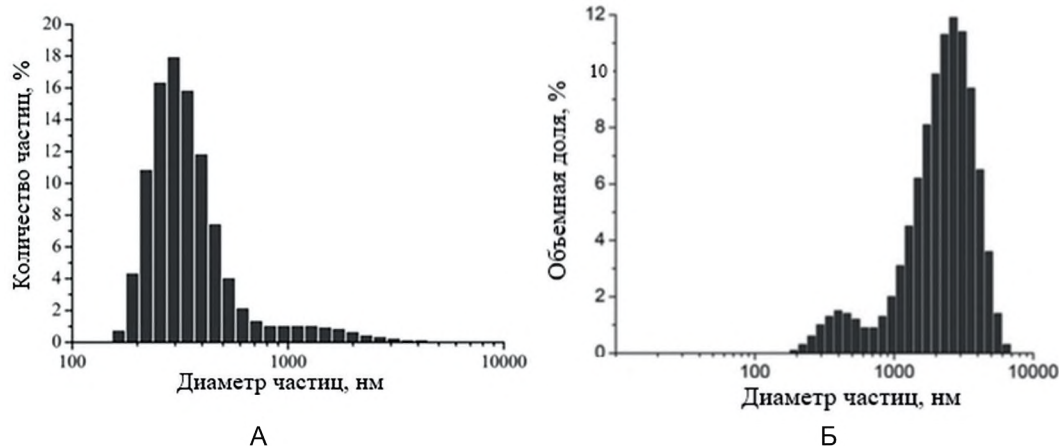


Рисунок 4 – Примеры гистограмм счетного (А) и объемного (Б) распределения частиц по размерам [4]
 Figure 4: Examples of histograms of countable (A) and volumetric (Б) particle size distribution [4]

сами, по сути, становятся элементарными единицами ДФ, т.е. ведут себя и рассматриваются как частицы. При этом, в некоторых случаях, кажущаяся плотность агломератов, может быть меньше плотности вещества частицы. Элементарные единицы ДФ могут быть составными, например, полыми каплями жидкости с газообразными включениями, или полыми твердыми частицами, содержащими вещество-наполнитель. Плотность таких частиц может значительно отличаться от плотности основного исходного вещества. В работе [3] предполагается, что кажущаяся плотность частиц в дымах может составлять от 10 до 70 % от действительного значения плотности, однако сведения об экспериментальных данных, на основании которых сделаны данные выводы не приводятся. Кроме того, вещество описанных выше элементарных единиц ДФ может существенно отличаться по характеру взаимодействия с электромагнитным излучением (поглощение, рассеяние), в том числе в оптическом диапазоне.

Поверхностные свойства частиц дисперсной фазы

Аэрозольные частицы имеют малые размеры по сравнению с массивными образцами вещества, из которого они состоят, в силу чего, по сравнению с последними, имеют очень развитую поверхность, на которой могут протекать разнообразные процессы – химические реакции, адсорбция, накопление или стекание электрического заряда и т.д. Относительная площадь поверхности частиц увеличивается с уменьшением их размера. Поверхностные свойства могут оказывать влияние на образование агломератов частиц, а, следовательно, на совокупные размерные характеристики ДФ. Микрорельеф поверхности, в некоторых случаях, может оказывать также достаточно существенное влияние на рассеяние оптического излучения.

Влияния морфологических характеристик дисперсной фазы на свойства аэрозолей, определяющие их взаимодействие с электромагнитным излучением

Взаимодействие ЭМИ с частицами ДФ, в том числе в оптическом диапазоне, характеризуется поглощением (преобразованием электромагнитной энергии в другие виды энергии, например, в тепловую) и рассеянием, как на каждой частице, так и на ансамбле частиц в целом. Достаточно точная

физико-математическая модель взаимодействия ЭМИ с частицами существует только для однородных частиц сферической формы (классическая теория Ми) [27]. Существуют также другие частные математические модели, например, для случая сферических частиц, составленных из однородного ядра и неоднородной с ним оболочки [39–42].

Общее уменьшение интенсивности ЭМИ после прохождения через аэрозольную среду называется экстинкцией [27]. Методики измерения экстинкции как макрофизической характеристики аэрозольной среды в оптическом диапазоне достаточно хорошо проработаны и широко применяются на практике [43].

Учитывая вышеизложенное, экспериментальные исследования зависимости экстинкции от микрофизических свойств частиц ДФ имеют большое значение.

Обзор методов и средств исследования морфологических и структурных характеристик дисперсной фазы аэрозолей

Для проведения дисперсного анализа было разработано большое количество методов исследований и технических средств их реализации. Некоторые из этих методов, появившиеся исторически первыми, не удовлетворяют современным требованиям и уровню технического развития, поэтому в настоящее время практически не используются. Другие методы являются слишком трудоемкими и неудобными, в силу чего также не нашли широкого применения; наиболее полную ретроспективу таких методов и технических средств их реализации можно найти в работах [44–46]. В данной статье рассматриваются только наиболее распространенные и современные методы измерений основных морфологических и структурных характеристик частиц ДФ (дисперсного анализа аэрозолей). Некоторые методы, не нашедшие достаточно широкого применения, упоминаются в статье для формирования представления о возможностях и разнообразии существующих способов дисперсного анализа. Методы, являющиеся, по мнению авторов, перспективными для применения в заявленных целях рассмотрены более детально.

В работе [47] предлагается условно разделить методы дисперсного анализа на две большие группы: методы предварительного осаждения и бесконтактные (в основном оптические) методы².

² Бесконтактные, по-видимому, исходя из предположения о минимальном влиянии электромагнитного излучения оптического диапазона на исследуемые свойства частиц.

Однако с метрологической точки зрения представляется более целесообразным разделять их, в первую очередь, на методы, позволяющие выполнять непосредственные (прямые) измерения искомых величин, характеризующих микрофизические свойства аэрозолей, и косвенные методы измерений, основанные на измерении иных величин, функционально связанных с искомыми. Исходя из этого представления составлена схема основных методов дисперсного анализа аэрозолей, приведенная на рисунке 5.

При этом следует иметь в виду, что все косвенные методы измерений параметров ДФ требуют проведения предварительной градуировки, основанной на сравнении полученных с их помощью результатов с действительными значениями, определяемыми методами прямых измерений.

Методы разделения фаз аэрозольной системы

Методы осаждения. Методы предварительного осаждения ДФ, основанные на физико-математических моделях естественного (гравитационного) или принудительного (инерционного) осаждения частиц, с последующим измерением их общего (интегрального) количества или взятием проб для последующего детального исследования. Использование технических средств специальной конструкции (каскадные импакторы, импиджеры, конифуги) позволяет с приемлемой точностью разделять частицы на несколько фракций по размерам³. Из приборов, реализующих эти методы в настоящее время наибольшее распространение нашли фотоденситометры [48–50].

При использовании седиментационных методов осаждения (без последующего проведения дополнительных детальных исследований) размеры частиц определяются как диаметр эквивалентной сферической частицы, имеющий такую же скорость осаждения, как и исследуемые частицы (диаметр Стокса). Имеются достаточно современные технические реализации приборов, выполняющих измерения данным методом [49].

Существуют также методы осаждения под действием других физических полей, например, тепловых (термопреципитация) и электростатических (электропреципитация). Более подробно данные методы, их недостатки и ограничения применения описаны в работах [5, 45].

Методы механического разделения. К методам механического разделения относятся также ситовый анализ, практически непригодный для аэрозолей, и методы фильтрации, основанные на задержании частиц ДФ на фильтрах при принудительном пропускании через них аэрозоля. Успешная реализация данного метода применительно к конкретной задаче определяется правильным выбором фильтра и режимов пропускания через фильтр.

Методы разделения фаз в большинстве случаев позволяют производить отбор проб частиц непосредственно из аэродисперсной системы, в том числе в естественной (нативной) среде, с возможностью последующих прямых измерений некоторых интегральных характеристик ДФ, например, массовой или объемной концентрации частиц гравиметрическим и пьезобалансным методами или методом осциллирующих микровесов с коническим элементом (ТЕОМ) [51], при этом результаты таких измерений не зависят от физико-химических свойств частиц ДФ. Основным преимуществом данной группы методов является возможность последующего выполнения прямых измерений параметров выделенных с их помощью частиц ДФ микроскопическими методами. К недостаткам могут быть отнесены высокая трудоемкость, дискретная селективность, цикличность измерений и низкая чувствительность, что обуславливает длительность пробоотбора до нескольких часов при измерении малых концентраций [47].

Одной из основных проблем при использовании методов предварительного осаждения частиц, является сложность и трудоемкость получения пробы, представительной



Рисунок 5 – Основные методы дисперсного анализа аэрозолей (рисунок авторов)
Figure 5: Basic methods of aerosol dispersion analysis (authors' drawing)

³ В данном случае, под фракционными «размерами» в зависимости от конкретного метода разделения следует понимать седиментационные или аэродинамические эквивалентные диаметры.

по отношению ко всему аэрозольному образованию или к его существенной части. Практическая результативность этих методов во многом зависит от условий отбора проб и погрешностей, вносимых пробоотборным устройством. Кроме того, в большинстве случаев, при отборе проб невозможно выполнить условие изокINETичности, которое выполняется только при равенстве по величине и направлению скорости всасывания аэрозоля в прибор и вектора внешней скорости движения аэродисперсной системы [46, 47].

Наиболее простым в реализации и потому распространенным в настоящее время является метод разделения фаз путем, принудительного пропускания аэрозоля через фильтр, что в большинстве случаев обеспечивается с помощью отсасывающего компрессора. Основной проблемой при реализации данного метода является выбор подходящего фильтра, особенно для частиц мелких фракций, исключающего или минимизирующего взаимодействие с аэрозолем, например, с влагой прокачиваемой среды, вследствие чего за счет впитывания может изменяться масса фильтра, что создает дополнительную погрешность при выполнении гравиметрических измерений массовой концентрации твердых частиц ДФ.

Тем не менее, методы осаждения и фильтрации частиц, в ряде случаев безальтернативно, позволяют получить образцы, включая распределенный двумерный статический ансамбль частиц на поверхности фильтра, для последующего измерения их параметров другими методами, в том числе непосредственного наблюдения формы и измерений их линейных размеров с использованием микроскопов [51–54]. Более подробно методы предварительного осаждения и способы отбора проб рассмотрены в работах [5, 16, 17].

Гидроаэродинамические методы разделения. Основаны на разделении дисперсной фазы на фракции в восходящем потоке жидкости (промывание) или газа (продувание) с постоянной или переменной скоростью движения разделяющей среды [55]. В настоящее время для дисперсного анализа практически не применяются.

Электрические методы измерений

Электрические методы измерений параметров аэрозоля в настоящее время также не имеют широкого распространения, поэтому приведем только их краткое описание: ин-

дукционный основан на определении наведенного на электроде измерительной камеры заряда при движении через нее заряженных частиц аэрозоля; контактно-электрический – на способности частиц накапливать электрический заряд при соприкосновении с твердым телом; емкостный – на изменении емкости конденсатора при введении частиц аэрозоля между его пластинами; пьезоэлектрический – на возникновении электрических импульсов на пьезоэлементе при соударении с ним частиц аэрозоля.

Электрические методы являются косвенными, поэтому результаты измерений в существенной степени зависят от свойств частиц аэрозоля: проводимости, диэлектрической проницаемости, массы, размеров, скорости соударения и других.

Микроскопические методы измерений

Микроскопические методы основаны на анализе с использованием многократного увеличения изображений частиц, либо непосредственно наблюдаемых, либо предварительно зафиксированных. Эти методы позволяют получить наиболее достоверную информацию о форме, количестве и размерах частиц, а также о распределении размеров [54]. Важнейшими характеристиками микроскопических систем являются увеличение и разрешающая способность микроскопа [56, 57]. Микроскопические методы дисперсного анализа аэрозолей, в большинстве случаев, являются оптическими и позволяют выполнять прямые измерения размерных параметров частиц путем непосредственного визуального сличения со шкалой единиц длины [58]. Для анализа в субмикронном диапазоне размеров частиц в последнее время стали применяться также современные компактные электронные микроскопы [59, 60], например, такие как настольный сканирующий электронный микроскоп JEOL JCM-7000⁴. Может быть также рассмотрена возможность и целесообразность применения для этих целей конфокальной лазерной сканирующей микроскопии [57, 61], например, конфокального микроскопа CHOTEST VT6100⁵.

Методы микроскопического анализа изображений в свою очередь делятся на статические и динамические.

Статический микроскопический анализ изображений. Метод статического микроскопического анализа изображений основан на исследовании неподвижных и неизменных в период наблюдения объектов, поэтому, в

⁴ URL: <https://www.ru.jeol.com/products/scientific/sem/jcm-7000.php> (дата обращения: 22.04.2024).

⁵ URL: <https://en.chotest.com/detail.aspx?cid=989> (дата обращения: 22.04.2024).

большинстве случаев, нуждается в предварительном отборе проб частиц ДФ. Общим недостатком статического анализа изображений является сложность подготовки представительной пробы (наследуется от методов пробоотбора), и значительная трудоемкость выполнения измерений достаточно большого количества частиц, необходимого для получения репрезентативных и статистически приемлемых результатов. В настоящее время для снижения времени измерений этим методом и исключения ошибок оператора используется специализированное программное обеспечение для автоматизированного анализа изображений частиц [52], например, такое как бесплатная программа ImageJ⁶. Программа ImageJ предназначена для обработки различных научных и технических изображений. В части дисперсного анализа программа может рассчитывать площади плоских фигур нерегулярной формы, создавать гистограммы распределения, трансформировать изображения, уменьшать шум изображения, обнаруживать края объектов, оценивать углы и расстояния, управлять внешним оборудованием, например, оптическими микроскопами, и многое другое. Программа имеет открытый исходный код и большое количество уже разработанных специализированных плагинов, имеет встроенный редактор плагинов и компилятор Java, а также инструментарий для создания макрокоманд и пользовательских функций [62]. Есть также подобные коммерческие программные продукты, в том числе отечественной разработки, например, Altami Studio 4.0 (ООО «Альтами», г. Санкт-Петербург)⁷. Существующие алгоритмы компьютерной обработки изображений дисперсных систем, как и технические средства их реализации непрерывно совершенствуются [52, 63].

Динамический микроскопический метод анализа изображений. Развитие современных аппаратных средств цифровой обработки сигналов в последнее время привело к широкому распространению метода динамического микроскопического анализа, именуемого также динамическим анализом изображений⁸. Основным его преимуще-

ством перед другими микроскопическими методами является возможность (помимо определения размера частиц) количественно описывать форму предварительно заданным набором размерных параметров и визуально оценивать популяцию частиц в режиме реального времени при прохождении ДФ через измерительный канал. Измерения размерных параметров, выполненные данным методом, являются прямыми измерениями.

На динамический анализ изображений не влияют свойства материала частиц, поэтому его можно применять для анализа многокомпонентных смесей, кроме того, метод позволяет различать и количественно определять прозрачность частиц [34]. К недостаткам метода следует отнести зависимость результата измерений от пространственной ориентации частицы относительно плоскости измерений, а также ограниченная глубина резко изображаемого пространства, впрочем, эти недостатки в той или иной степени присущи всем оптическим методам.

Однако серийно выпускаемые технические средства динамического анализа изображений, как и большинство приборов, реализующих современные косвенные оптические методы дисперсного анализа, в основном ориентированы на определение гранулометрического состава порошкообразных материалов и дисперсных свойств промышленных аэрозолей в виде предварительно осажденных проб в порошкообразной форме. Для проведения анализа порошки диспергируются в жидкой или воздушной среде, после чего подвергаются процедурам измерений. Конструкция таких приборов имеет специфические особенности, которые не подходят для дисперсного анализа аэрозолей в нативной форме без оказания на нее существенного воздействия. Типичные схемы измерительных каналов с устройствами ввода проб представлены на *рисунке 6*.

Современные приборы динамического анализа изображений, такие как, Samsizer X2 (фирма «Retsch Technology», Германия, г.р. № 82193-21⁹), Analysette 28 Image Sizer (фирма «Fritch», Германия, г.р. № 85216-22), Winner

⁶ URL: <https://imagej.net> (дата обращения: 22.04.2024).

⁷ URL: <https://altamisoftware.ru> (дата обращения: 24.04.2024).

⁸ ISO 13322-2:2021 Particle size analysis - Image analysis methods – Part 2: Dynamic image analysis methods (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/1e1e64a5-5a48-4b63-b8b3-14b3f036cbc8/iso-13322-2-2021>; дата обращения: 03.05.2024).

⁹ Здесь и далее таким образом (г.р. №...) указывается номер записи в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>), в которой содержится описание указанного типа средства измерений (в случае, если такая запись имеется).

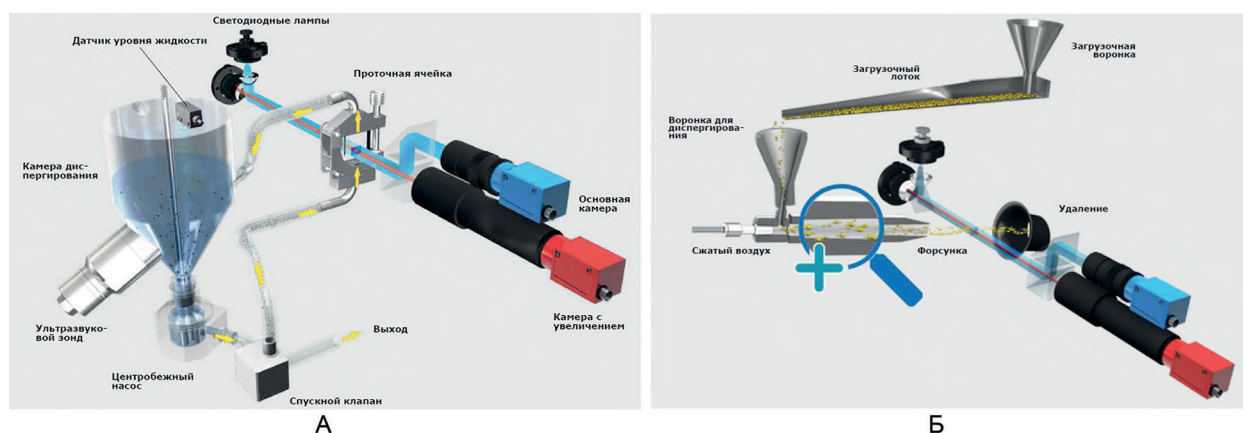


Рисунок 6 – Типичные схемы ввода порошкообразных проб в приборы дисперсного анализа в жидкой (А) и газообразной (Б) среде (URL: https://llcvek.ru/wp-content/uploads/2017/08/brochure_camsizerX2_ru.pdf; дата обращения: 14.04.2024)

Figure 6: Typical schemes for introducing powdered samples into disperse analysis devices in liquid (A) and gaseous (B) media (URL: https://llcvek.ru/wp-content/uploads/2017/08/brochure_camsizerX2_ru.pdf; accessed: 14.04.2024)

300D (фирмы Jinan Winner Particle Instrument Stock, Китай)¹⁰, Morphologi G3 (фирма Malvern Instruments, Великобритания)¹¹, позволяют практически полностью автоматизировать процесс измерения размеров частиц с минимальными погрешностями.

Оптические методы косвенных измерений

Значительно большее распространение получили косвенные оптические методы, основанные на оценке взаимодействия электромагнитного излучения оптического диапазона (светового потока) с различными объектами. При взаимодействии светового потока с объектом часть потока отражается от поверхности раздела сред, часть проходит сквозь объект, часть огибает объект в результате дифракции (рисунок 7).

В силу этого косвенные оптические методы можно разделить на три большие группы, основанные на оценке дифракционных явлений, изменений прошедшего и отраженного светового потока, кроме того, возможны их комбинации. При этом могут оцениваться как статические (интенсивность светового потока и его пространственно-временные зависимости), так и динамические характеристики, например, доплеровское изменение частоты электромагнитных колебаний, как в анализаторе размера частиц SV100 V2 (фирма HORIBA Ltd., Япония, р.г. № 88681–23). Наиболее полный и детальный обзор теоретиче-

ских основ косвенных оптических методов приведен в работе [64].

В настоящее время известно более 50 различных косвенных оптических методов и их модификаций [47], в то же время, с развитием технологий, в первую очередь компьютерных, оптические методы продолжают постоянно совершенствоваться и появляются новые. Однако из всей совокупности известных оп-



Рисунок 7 – Схемы взаимодействия электромагнитного излучения со сферическим объектом в представлении геометрической оптики [34]

Figure 7: Diagrams of the interaction of electromagnetic radiation with a spherical object in the representation of geometric optics [34]

¹⁰ URL: <https://www.winner-psa.com/particle-image-system/winner300d-dynamic-dry-particle-image-analyzer.html> (дата обращения: 26.04.2024).

¹¹ URL: <http://malvern.nt-rt.ru> (дата обращения: 26.04.2024).

тических методов, наибольшее распространение получили только некоторые из них.

Метод измерений интенсивности рассеянного света. Наиболее распространенным (по числу применений) является метод измерений интегральной интенсивности рассеянного света. Данный метод стандартизован¹² и используется в большом количестве моделей счетчиков частиц. Конструкция счетчика реализована таким образом, чтобы из подаваемой в измерительную ячейку пробы апертуру светового потока в каждый момент измерения пересекала только одна частица (рисунок 8).

Таким образом, оценивается единичное событие взаимодействия оптического излучения с частицей по интенсивности рассеянного излучения, пропорциональной размеру частиц, а также количество таких событий пропорциональное их концентрации.

Существенным недостатком счетчиков аэрозольных частиц является невозможность получить сведения о реальной форме и структуре частиц. Размер частицы, полученный с использованием метода измерений интегральной интенсивности рассеянного света, как, впрочем, и любого другого косвенного оптического метода, является эквивалентным оптическим диаметром (см. таблицу 1).

Типичными представителями средств измерений, реализующих данный метод, являются, например, счетчики аэрозольных частиц серии APEx (фирмы Lighthouse, США,

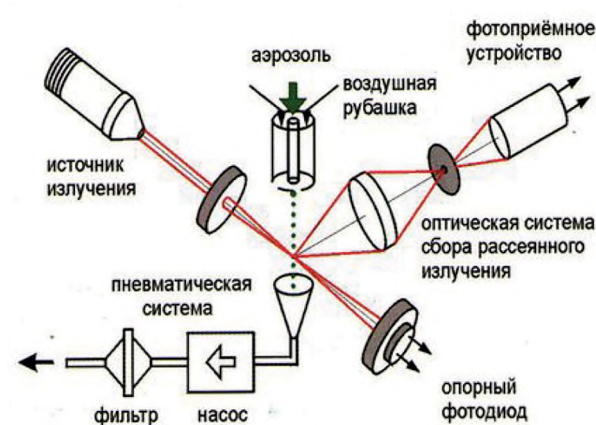


Рисунок 8 – Типичная обобщенная оптическая и пневматическая схема счетчика аэрозольных частиц [65]
Figure 8: Typical generalized optical and pneumatic circuit of an aerosol particle counter [65]

г.р. № 77595–20), серии АЭРОКОН (ООО НПО «Эко-Интех», Россия, г.р. № 78323–20), MetOne (фирмы Beckman Coulter, Inc., США, г.р. № 73699–18, Fluke 985 (фирмы Fluke Corporation, США, г.р. № 54041–13).

Метод статического рассеяния света. Метод статического рассеяния света известен также как метод полной индикатрисы или метод лазерной дифракции.

Суть метода лазерной дифракции заключается в том, что монохроматический когерентный луч света, взаимодействуя с частицей, рассеивается под соответствующими углами с определенными относительными (по отношению к падающему лучу) интенсивностями, образуя диаграмму рассеяния (рисунок 9), именуемую также индикатрисой рассеяния.

На основании теории Ми или приближения Фраунгофера рассчитывается распределение по размерам совокупности сфер, производящих специфическую дифракционную картину для света с определенной длиной волны в дисперсной среде с известным индексом преломления. Типичная схема анализатора на основе метода лазерной дифракции приведена на рисунке 10.

Однако следует иметь в виду, что у классической теории Ми имеется ряд ограничений и она строго соблюдается, только если:

- частицы имеют сферическую форму и изотропны, рассеивая свет одинаково во всех направлениях;
- концентрация частиц в пробе достаточно мала, чтобы не происходило множественного рассеяния, т.е. последовательного взаимодействия светового потока с несколькими частицами до детектирования;
- все частицы имеют одинаковый показатель преломления.

Размер частицы, измеренный методом статического рассеяния света, в общем случае является эквивалентным диаметром сферы из того же материала, производящей картину рассеяния, наиболее похожую на фактически наблюдаемую, т.е. оптическим диаметром (таблица 1).

Развитие теории рассеяния [66–69] и современной вычислительной техники, применение детекторов с более высокой чувствительностью и быстродействием, более совершенных оптических систем в последних моделях приборов, реализующих метод лазерной дифракции, позволили, по утверждениям их разработчиков, более адекватно оце-

¹² ISO 13323:2020 Determination of particle size distribution. Single - particle light interaction methods. Part 1: Light interaction considerations (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/1e1e64a5-5a48-4b63-b8b3-14b3f036cbc8/iso-13323-2020>; дата обращения: 03.05.2024).

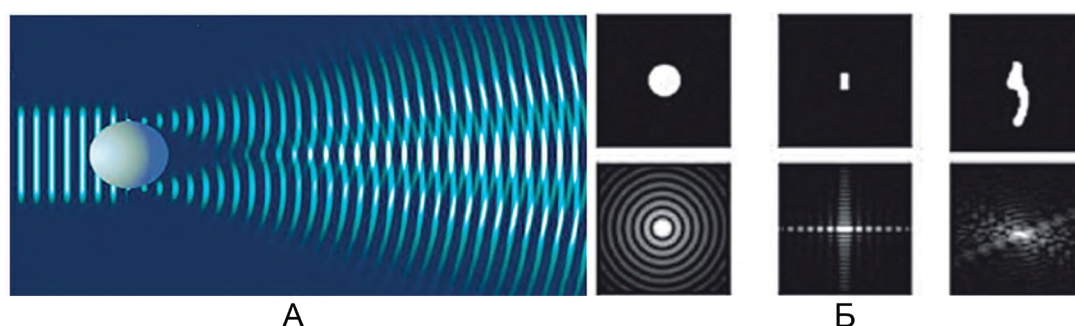


Рисунок 9 – Схематическая визуализация лазерной дифракции в плоскости перпендикулярной плоскости измерений (А) и влияние формы объектов (вверху) на диаграмму рассеяния (внизу) в плоскости измерений (Б) [36]
Figure 9: Schematic visualization of laser diffraction in a plane perpendicular to the measurement plane (A) and the effect of the shape of objects (above) on the scattering diagram (below) in the measurement plane (B) [36]

нивать распределение по размерам частиц несферической формы из поглощающих свет материалов¹³.

Любые отклонения от принятых в теории Ми допущений образуют методическую составляющую погрешности результата измерений. Например, если проба содержит частицы с различными показателями преломления, получаемое распределение по размерам будет относиться к сферам, имеющим одинаковый показатель преломления, и будет искаженным относительно истинного распределения размеров частиц. Аналогично, если частицы имеют неоднородную форму или являются пористыми, получаемое распределение частиц по размерам также может быть искаженным [60, 66, 70]. Учитывая, что методическая погрешность имеет в основном систематический характер, можно предположить, что существуют определенные способы градуировки, при помощи которых методиче-

ская погрешность в значительной мере может быть компенсирована, по крайней мере, для некоторых параметров ДФ и условий их измерений.

К основным преимуществам метода лазерной дифракции обычно относят небольшое время проведения измерений (как правило, несколько минут), широкий диапазон измеряемых размеров (от десятков нанометров до миллиметров), воспроизводимость в одинаковых условиях измерений, небольшое количество пробы, одновременный анализ частиц в широком размерном диапазоне. Метод стандартизован¹⁴ обладает высокой воспроизводимостью и чувствительностью, что позволяет определять малейшие различия распределения частиц по размерам.

Ограничения применения косвенных оптических методов для исследования аэрозольных образований для снижения заметности

Предшествующее рассмотрение показывает, что все косвенные оптические методы позволяют измерять только оптический диаметр частиц, что вполне приемлемо с точки зрения оценки экстинкции аэрозольных систем, но не вполне – для оценки их поведения в остальных случаях, например времени существования аэрозольной завесы. Прямые оптические методы позволяют непосредственно определять форму и размеры частиц, но требуют либо значительных затрат времени, либо значительные вычислительные ресурсы. Впрочем, последнее вполне успешно реализуется в современных приборах динамического анализа изображений. Логично также предположить, что прямой оптический метод может быть использован

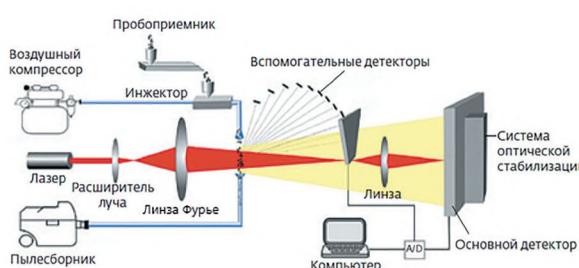


Рисунок 10 – Типичная схема реализации метода лазерной дифракции в современном анализаторе размера частиц [37]
Figure 10: Typical scheme of implementation of the laser diffraction method in a modern particle size analyzer [37]

¹³ URL: <https://www.microtrac.com/files/96414/sync.pdf> (дата обращения: 26.04.2024).

¹⁴ ISO 13320:2020 Particle size analysis - Laser diffraction methods (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/27fd2441-4ee2-4c37-93acce572523d0aa/iso-13320-2020>; дата обращения: 30.05.2024).

для градуировки более производительных косвенных оптических методов. В этой связи следует отметить, что в настоящее время поверка и градуировка приборов, реализующих косвенные оптические методы, в большинстве случаев осуществляются с использованием стандартных образцов, состоящих из твердых¹⁵ и жидких [71] частиц правильной сферической формы с известным размером или известным распределением размеров, т.е. осуществляется по оптическому диаметру.

Пожалуй, самой большой проблемой косвенных оптических методов измерений, с учетом конструктивных особенностей серийно изготавливаемых технических средств их реализации, является неприспособленность последних для дисперсного анализа микрофизических параметров аэрозольных образований для снижения заметности. Как уже было отмечено, измерительные каналы большинства современных приборов, реализующих косвенные оптические методы, не приспособлены для анализа аэрозолей в естественной форме. Чаще всего конструктивно они обеспечивают анализ порошкообразных проб, которые подвергаются предварительной подготовке перед введением в измерительный канал либо диспергированием в жидкости или в воздушном потоке, либо вводятся в свободном падении. Это относится и к отечественным анализаторам размеров частиц ФОТОКОР (ООО «Фотокр», Россия) и ЛАСКА (ООО «БиоМедСистем», Россия, г.р. № 72792–18), которые могут выполнять анализ только жидких проб.

Приборы, выполняющие измерения линейной последовательности единичных частиц (счетчики частиц), хотя, во многих случаях, и позволяют забирать пробу непосредственно из естественной (нативной) формы аэрозоля, однако перед подачей в измерительный канал подвергают ее существенной трансформации, в том числе способствующей деагломерации и разрушению частиц (рисунок 11).

Следует также учитывать возможность оседания частиц на стенках узких измерительных каналов, что ведет к занижению измеряемого количества частиц и постепенному загрязнению каналов, что особенно критично в зоне измерений.

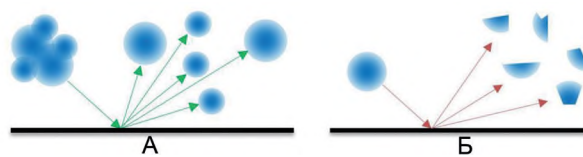


Рисунок 11 – Схематическая иллюстрация деагломерации (А) и разрушения частиц (Б) в процессе принудительного движения пробы в измерительном канале (URL: www.paar.ru; дата обращения: 15.04.2024)

Figure 11: Schematic illustration of deagglomeration (A) and particle destruction (Б) during forced sample movement in the measuring channel (URL: www.paar.ru; access date: 15.04.2024)

Применение значительных аэродинамических и механических воздействий на аэрозольные системы сопровождается искажениями как состава, так и размеров частиц, например, приводит к разрушению частиц и агломератов, образовавшихся в нативном аэрозоле в результате коагуляции, что может оказать существенное влияние на результаты измерений. Внесение конструктивных изменений в измерительные каналы таких приборов в большинстве случаев невозможно без изменения характеристик приборов, в том числе без корректировки их программного обеспечения, поскольку большинство параметров определяются путем вычислений. Такие изменения могут быть качественно выполнены только изготовителем после проведения необходимых испытаний.

Исключением являются несколько типов лазерных дифракционных анализаторов, конструктивное исполнение которых имеет не узкий измерительный канал, а достаточно широкое пространство между источником и приемником оптического излучения, такие как AEROTRAC II (фирма Microtrac, Inc., США)¹⁶, SPRAYTEC (фирма Malvern Panalytical Ltd., Великобритания)¹⁷, PW180-C (NKT Analytical Instruments, Китай)¹⁸ (рисунок 12).

Эти приборы сконструированы специально для исследований медицинских аэрозолей (спреев), что в наибольшей степени соответствует задаче исследований аэрозольных образований для снижения заметности.

¹⁵ МП 242-2426-2021 Государственная система обеспечения единства измерений. Анализаторы размера частиц Wintrac. Методика поверки. СПб: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». 2011. 6 с. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/api/downloadfile/7f23640f-c77f-4532-8b22-a3d155bdac36> (дата обращения 15.04.2024).

¹⁶ URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).

¹⁷ URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).

¹⁸ URL: www.rvs-ltd.ru (дата обращения: 15.04.2024).

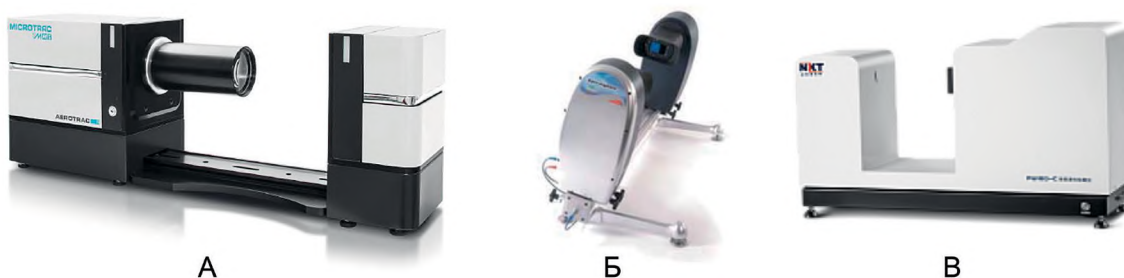


Рисунок 12 – Внешний вид приборов для анализа дисперсных характеристик спреев: А – AEROTRAC II (URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf>; дата обращения: 15.04.2024), Б – SPRAYTEC (URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf>; дата обращения: 15.04.2024), В – PW180-C (URL: www.rvs-ltd.ru; дата обращения: 15.04.2024)

Figure 12: External appearance of devices for analyzing the dispersion characteristics of sprays: A, AEROTRAC II (URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf>; access date: 15.04.2024); Б, SPRAYTEC (URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf>; access date: 15.04.2024); В, PW180-C (URL: www.rvs-ltd.ru; access date: 15.04.2024)

И наконец, самым важным ограничением возможности применения того или иного метода и конкретных технических средств их реализации является соответствие доступного для них диапазона измерений размеров объектов диапазону распределения выбранного эквивалентного размера частиц аэрозольного образования. В соответствии с приводимыми в различных источниках данными, туманы имеют достаточно крупный размер частиц в диапазоне от 1 до 100 мкм [5, 33], в то время как у дымов размеры частиц меньше и составляют от 0,1 до 10 мкм [4, 5, 73, 74]. Однако сведения о диапазонах распределения размеров частиц в дымах у разных авторов несколько расходятся. Кроме того, размеры частиц могут значительно варьироваться в зависимости от типа аэрозольного образования, способа и условий его формирования, а также авторы обычно не указывают, какие именно эквивалентные размеры были использованы.

Приборы, реализующие метод интенсивности рассеянного света (счетчики частиц), типично позволяют измерять размеры частиц от 0,2 до 40 мкм, приборы динамического анализа изображений – от 0,8 до 1000 мкм, лазерные дифракционные анализаторы – от 0,1 до 1000 мкм (и более). Для оптической микроскопии минимальные размеры наблюдаемых объектов составляют 0,28 мм, при использовании иммерсионных систем – 0,18 мкм, при использовании ультрафиолетового света можно добиться разрешения 0,1 мкм [54]. Для электронной и конфокальной лазерной микроскопии ограничений при измерениях частиц минимальных размеров практически нет, но могут возник-

нуть проблемы с измерением размеров более крупных частиц.

Таким образом, выполнять измерения во всем предполагаемом диапазоне распределения размеров частиц дыма без ограничений возможно только с использованием лазерного дифракционного анализа, хотя он имеет ряд других существенных ограничений, описанных выше. Кроме того, следует учитывать, что речь идет не об исследовании дымов вообще, а об аэрозольных образованиях для снижения заметности, которые могут содержать как твердые частицы, характерные для дыма, так и более крупные жидкие, характерные для туманов. При этом можно предположить, что большая часть частиц, вероятно, наиболее значимая для экстинкции, будет находиться в диапазоне размеров более 0,5 мкм, т.е. будет доступна для измерения почти всеми рассмотренными методами.

Совместное применение различных методов

Учитывая вышеизложенное, можно прийти к выводу, что ни один из рассмотренных методов в совокупности с конструктивными ограничениями средств их реализации не позволяет в полном объеме исследовать дисперсные характеристики и не дает гарантии достоверности результатов дисперсного анализа частиц ДФ аэрозолей в нативной форме. Решение этой проблемы возможно одновременным или последовательным применением различных прямых и косвенных методов измерений, в том числе с разным порогом чувствительности.

Перспективность такого подхода осознается и некоторыми изготовителями при-

боров дисперсного анализа. Объединение методов лазерной дифракции и динамического анализа изображений реализована, например, в анализаторе размера и формы частиц Microtrac SYNC (фирма Microtrac Ink., США, г.р. № 88681–23). Пользователь может по своему усмотрению выполнять анализ методом лазерной дифракции или посредством динамического анализа изображений, а также сочетать оба метода с помощью специальной опции программного обеспечения. Однако детали совместного применения обоих методов в общедоступных документах изготовителем не описаны.

Применительно к исследованию микрофизических характеристик аэрозольных образований для снижения заметности представляется целесообразным на данном этапе для измерений размеров частиц ДФ в качестве прямого метода применять метод статического анализа изображений, в первую очередь потому, что пока отсутствуют пригодные для этих целей приборы динамического анализа изображений. Следует также учитывать, что большинство приборов косвенных оптических измерений, за исключением счетчиков частиц, не предназначены для использования в полевых условиях. Метод статического анализа изображений предусматривает предварительный отбор образцов методом фильтрации, что вполне реализуемо практически в любых условиях, включая полевые.

Кроме того, оптические методы не позволяют производить прямое измерение массовой концентрации ДФ. Вычисление их на основании размерных параметров, получаемых оптическими методами, требует дополнительных сведений о свойствах материала частиц, что не всегда доступно. Методы седиментации также являются косвенными и, в общем случае, нуждаются в градуировке с использованием прямых методов. Наилучшим решением для измерения массовой концентрации является использование прибора, реализующего гравиметрический, пьезобалансный или ТЕОМ прямой метод измерений.

Однако применение фильтрационного метода, хотя это увеличивает трудоемкость и накладывает дополнительные ограничения на точность измерений, тем не менее, позволяет определять массовую концентрацию ДФ самым простым способом: путем взвешивания

на лабораторных весах фильтра до и после отбора проб.

В качестве дополнительного средства для проведения большого объема измерений в лабораторных условиях могут рассматриваться лазерные дифракционные анализаторы, предназначенные для анализа медицинских спреев в совокупности со специально изготовленными камерами генерации аэрозолей и каналами их подачи в зону измерений естественным способом или с незначительными стимулирующими воздействиями. Уменьшение влияния формы и оптических свойств частиц на результаты измерений, теоретически может быть достигнуто за счет создания методик градуировки на основе метода статического анализа изображений.

Заключение

Для исследования влияния микрофизических свойств дисперсной фазы аэрозольных средств снижения заметности на поглощение и рассеяние электромагнитного излучения в оптическом, инфракрасном и радиолокационном диапазоне и на пространственно-временную устойчивость аэродисперсных систем необходимо проведение измерений свойств отдельных частиц, в первую очередь их формы, размеров, счетной концентрации и статистического распределения в аэрозольном образовании. Наиболее подходящим для этого, по мнению авторов, является совместное применение нескольких прямых и косвенных методов измерений, минимальный состав которых с учетом конструктивных особенностей реализующих их технических средств, может состоять из средств измерений, использующих методы фильтрационного разделения фаз (аспиратора), взвешивания (весов лабораторных специального класса), статического анализа изображений (микроскоп с программным обеспечением для дисперсного анализа изображений) и лазерного дифракционного анализа (в конструктивном исполнении с разнесенными источниками и приемниками). В настоящее время все перечисленное оборудование, за исключением приборов для лазерного дифракционного анализа, выпускается отечественной промышленностью. Например, анализатор структур многомасштабный SIAMS 800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург)¹⁹ с системой искусственного интеллекта для распознавания и классификации объектов²⁰.

¹⁹ URL: <https://siams.com/siamss800/?ysclid=mdhdbv76zg424066474> (дата обращения: 15.04.2024).

²⁰ URL: https://siams.com/siams_aim (дата обращения: 15.04.2024)

Ограничения исследования / Limitations of the study

Обусловлены использованием только открытых источников, в том числе доступных через сеть Интернет, а также научно-технической литературы, национальных и международных стандартов, технических описаний фирм-изготовителей оборудования, рассмотрены измерения только некоторых наиболее значимых микрофизических свойств частиц дисперсной фазы (формы, размеров, распределения по размерам и концентрации) наиболее распространенными в настоящее время методами исследований / Due to the use of only open sources, including those available via the Internet, as well as scientific and technical literature, national and international standards, and technical descriptions of equipment manufacturers, measurements of only some of the most significant microphysical properties of dispersed phase particles (shapes, sizes, concentrations, and size distributions) are considered to be the most common at present. research methods.

Список источников / References

1. Колесников ДП, Пенязь ВН, Голышев МА, Буряк ДН, Артамонов ИВ. Влияние дисперсности аэрозоля на его маскирующую способность. *Вестник войск РХБ защиты*. 2021;5(3):260–68.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
2. Kolesnikov DP, Penyaz VN, Golyshev MA, Buryak DN, Artamonov IV. Effect of Aerosol Dispersion on Its Masking Ability. *Journal of NBC Protection Corps*. 2021; 5(3): 260–68 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
3. Брусенин АА, Красильников СА, Пенязь ВН, Буряк ДН, Артамонов ИВ, Бурков ВД. Аналитическая зависимость вероятности маскировки объектов от плотности и дисперсности аэрозоля. *Вестник войск РХБ защиты*. 2023;7(1):53–61.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
4. Brusenin AA, Krasilnikov SA, Penyaz VN, Buryak DN, Artamonov IV, Burkov VD. Analytical Dependence of the Probability of Masking Objects on the Density and Dispersion of the Aerosol. *Journal of NBC Protection Corps*. 2023;7(1):53–61 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
5. Фукс НА. *Механика аэрозолей*. М.: Эксмо; 2009. 351 с.
6. Fuks NA. *Mechanics of aerosols*. Moscow: Eksmo; 2009. 351 p. (in Russian).
7. Райст П. *Аэрозоли. Введение в теорию*. М.: Мир; 1987. 280 с.
8. Raist P. *Aerosols. Introduction to theory*. Moscow: Mir; 1987. 280 p. (in Russian).
9. Грин Г., Лейн В. *Аэрозоли – пыли, дымы и туманы*. Ленинград: Химия; 1972. 427 с.
10. Grin G., Lein V. *Aerosols – dusts, smokes and fogs*. Leningrad: Chemistry; 1972. 427 p. (in Russian).
11. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Маскирующие дымы*. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы; 1947. 203 с.
12. Veitser YuI, Luchinsky GP. *Screening smokes*. Moscow: State research technical publishing of chemical literature; 1947. 203 p. (in Russian).
13. Зайцев ГС, Кузнецов АЯ. *Дымовые средства и дымообразующие вещества*. М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР; 1961. 83 с.
14. Zaitsev GS, Kuznetsov AI. *Smoke products and smoke-generating substances*. Moscow: Military publishing house of the Ministry of Defense Union SSR; 1961. 83 p.
15. Ивлев ЛС, Довгальук ЮА. *Физика атмосферных аэрозольных систем*. Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ; 1999. 194 с.
16. Ivlev LS, Dovgalyuk YuA. *Physics of atmospheric aerosol screens*. Saint-Petersburg: NIIN SPbGU; 1999. 194 p. (in Russian).
17. Семенченко БА. *Физическая метеорология*. М.: Аспект Пресс; 2002. 387 с.
18. Semenchenko BA. *Physical meteorology*. Moscow: Aspect Press; 2002. 387 p. (in Russian).
19. Кондратьев КЯ, Москаленко НИ, Поздняков ДВ. *Атмосферный аэрозоль*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1983. 254 с.
20. Kondrat'ev KYa, Moskalenko IA, Pozdnyakov DV. *Atmospheric aerosol*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 254 p. (in Russian).
21. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. *Математическое моделирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Монография*. Санкт-Петербург: издательство РГТУ; 2012. 83 с.
22. Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. *Mathematic modeling of optic characteristics of an optic aerosol. Monograph*. Saint-Petersburg: RGGMU publishing; 2012. 83 p. (in Russian).
23. Ишматов АН, Ахмадеев ИР. Применение метода малоуглового рассеяния лазерного излучения при исследовании импульсного распыления жидкостей. *Оптика атмосферы и океана*. 2013;26(1):81–4.

Ishmatov AN, Akhmadeyev IR. Application of the low-angle laser light scattering method for studying the pulse liquid atomization. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2013;26(1):81–4 (in Russian).

13. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. Определение оптических и микро-структурных характеристик атмосферного аэрозоля. *Ученые записки РГГМУ*. 2009;(11):71–8.

Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. Determining the optic and microstructural characteristics of an atmospheric aerosol. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2009;(11):71–8 (in Russian).

14. Валиулин СВ, Онищук АА, Бакланов АМ, Карасев ВВ, Дульцева ГГ. Измерительный аэрозольный комплекс. *Оптика атмосферы и океана*. 2024;37(06):496–501.

<https://doi.org/10.15372/AOO20240608>

Valiulin SV, Onischuk AA, Baklanov AM, Karasev VV, Dultseva GG. Aerosol measuring complex. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024;37(06):496–501.

<https://doi.org/10.15372/AOO20240608>

15. Сакерин СМ., Зенкова ПН., Кабанов ДМ, Калашникова ДА, Лисицын АП, Макаров ВИ, Полькин ВВ и др. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». *Оптика атмосферы и океана*. 2020;33(05):358–67.

<https://doi.org/10.15372/AOO20200505>

Sakerin SM, Zenkova PN, Kabanov DM, Kalashnikova DA, Lisitzin AP, Makarov VI, Polkin VV, et al. Results of studying physicochemical characteristics of atmospheric aerosol in the 71st cruise of RV “Akademik Mstislav Keldysh”. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020; 33(05):358–67.

<https://doi.org/10.15372/AOO20200505>

16. Козлов ПА. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград: Химия; 1971. 280 с.

Kozlov PA. *Basics of analysis of particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1971. 280 p. (in Russian).

17. Коузов ПА. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград: Химия, 1987. 264 с.

Kouзов PA. *Basics of analysis of particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1987. 264 p. (in Russian).

18. Хаякава И, ред. Чистые помещения. М.: Мир; 1990. 454 с.

Khayakava I, Ed. *Clean enclosures*. Moscow: Mir; 1990. 454 p. (in Russian).

19. Бурьянов ИА, Логачев КИ, Уваров ВА. Определение основных свойств пылевых частиц заточного участка. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020;(10):23–32.

<http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32>

Burianov IA, Logachev KI, Uvarov VA. Determination of the main properties of dust particles in the crinding area. *Bulletin of BSTU named after VG Shukhov*. 2020;(10):23–32 (in Russian).

<http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32>

20. Азаров ВН, Кузьмичев АА, Николенко ДА, Васильев АН, Козловцева ЕЮ. Исследование дисперсного состава пыли городской среды. *Вестник МГСУ*. 2020;15(3):432–42.

<http://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>

21. Hisman A, Ensor Azarov VN, Kuzmichev AA, Nikolenko DA, Vasilev AN, Koslovtseva EY. The research of dust dispersed composition of urban environment. *Vestnik MGSU*. 2020;15(3):432–42.

<http://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>

22. Башура ГС, Ефоян АС. Фармацевтические аэрозоли: научные разработки и организация производства. М.: Медицина; 1998. 236 с.

Bashura GS, Efoyan AS. *Pharmaceutical aerosols: scientific developments and production arrangement*. Moscow: Medicine; 1998. 236 p. (in Russian).

23. Терешкина ОИ, Павлов ВМ. Разработка проекта общей фармакопейной статьи «Аэрозоли». *Фармация*. 2005;(8):3–7.

Tereshkina OI, Pavlov VM. Development of project on a general pharmacopeial monograph “Aerosols”. *Pharmacia*. 2005;(8):3–7 (in Russian).

24. Медников ЕА. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Медицина; 1992. 422 с.

Mednikov EA. *Turbulent transmission and deposition of aerosols*. Moscow: Medicine; 1992. 422 p. (in Russian).

25. Fennelly K. Particle sizes of infectious aerosols: Implications for infection control. *Lancet Respiratory Medicine*. 2020;8(9):914–24.

[https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30323-4](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30323-4)

26. Пузач СВ, Журавлев ЮЮ, Болдрушкиев ОБ, Акперов РГ. Экспериментальная оценка объемной концентрации и размеров твердых частиц дыма, образующихся при терморазложении горючих материалов. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2024;(2):5–12.

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-5>

Puzach SV, Zhuravlev YY, Boldrushkiev OB, Akperov RG. Experimental assessment of volume concentration and sized of solid smoke particles formed during thermal decomposition of combustible materials. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2024;(2):5–12 (in Russian).
<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-5>

27. Борен К, Хафмен Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. М.: Мир; 1986. 664 с.

Boren K, Khafmen D. *Absorption and dispersion of light by small particles*. Moscow: Mir; 1986. 644 p. (in Russian).

28. Хюлст Г. *Рассеяние света малыми частицами*. М.: Издательство иностранной литературы; 1961. 536 с.

Khyulst G. *Dispersion of lights by small particles*. Moscow: Publishing of foreign literature; 1961. 536 p. (in Russian).

29. Дейрмеджан Р. *Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами*. М.: Мир; 1971. 303 с.

Deimerdzhian R. *Dispersion of electromagnetic pulse by spherical polydisperse particles*. Moscow: Mir; 1971. 303 p. (in Russian).

30. Степанова БИ, Иванова АП. *Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света*. Минск: Наука и техника; 1971. 487 с.

Stepanova BI, Ivanova AP (ed.). *Theoretical and applied problems of light dispersion*. Minsk: Science and technology; 1971. 487 p. (in Russian).

31. Перельман АЯ. Дифракция на сферически симметричных неоднородных структурах. *Оптика и спектроскопия*. 1995;78(5):822–31.

Perel'man AY. Diffraction on spherically symmetric heterogeneous structures. *Optics and spectroscopy*. 1995;78(5):822–31 (in Russian).

32. Басманов ПИ, Кириченко ВН, Филатов ЮН, Юров ЮЛ. *Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова*. М.: Наука; 2002. 193 с.

Basmanov PI, Kirichenko VN, Filatov YuN, Yurov YuL. *High efficiency gas purification from aerosols by Petryanov filters*. Moscow: Nauka; 2002. 193 p. (in Russian).

33. Исмаилов Ф. *Атмосферный аэрозоль*. Lap Lambert Academic Publishing; 2019. 357 с.

Ismailov F. *Atmospheric aerosol*. Lap Lambert Academic Publishing; 2019. 357 p. (in Russian).

34. Шахов М. Краткое руководство по методам определения размеров частиц. *Чистые помещения и технологические среды*. 2019;(3):8–21.

Shakhov PI. Brief guidance to the methods of identifying particle sizes. *Clean enclosures and technological media*. 2019;(3):8–21 (in Russian).

35. Sipkens TA, Boies A, Corbin JC, Chakrabarty RK, Olfert J, Rogak SN. Overview of methods to characterize the mass, size, and morphology of soot. *Journal of Aerosol Science*. 2023;(173):106211.

<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106211>

36. Тябина ИВ, Шахнович ОА. Современные методы гранулометрического анализа. Лазерные анализаторы размера частиц Winner. *Лаборатория и производство*. 2023;(2):48–57.

<https://doi.org/10.32757/2619-0923.2023.2.24.48.56>

Tyabina IV, Shakhnovich OA. Modern methods of grain size measurements. Laser analyzers of Winner particles' size. *Laboratory and manufacturing*. 2003;(2):48–57 (in Russian).

<https://doi.org/10.32757/2619-0923.2023.2.24.48.56>

37. Балаханов МВ. О создании системы метрологического обеспечения измерений дисперсных параметров аэрозолей и взвесей. *Альманах современной метрологии*. 2014;(1):185–232.

Balakhanov MV. On the creation of a system of metrological assurance for disperse parameters of aerosols and suspensions. *Almanac of modern metrology*. 2014;(1):185–232 (in Russian).

38. Роул А. Основные принципы анализа размеров частиц. Доступ:

<http://www.rusnanonet.ru/download/equipment/mrk0034r01.pdf>

Rowle A. *General principles of particle size analysis*. Available from:

<http://www.rusnanonet.ru/download/equipment/mrk0034r01.pdf> (in Russian).

39. Шифрин КС. *Рассеяние света в мутной среде*. М.: Гостехтеориздат; 1951. 264 с.

Shifrin KS. *Dispersion of light in a turbid medium*. Moscow: Gostechteorizdat; 1951. 254 p. (in Russian).

40. Шифрин КС. Рассеяние света на двухслойных частицах. *Изв. АН СССР, серия геофизическая*. 1952;(2):15–28.

Shifrin KS. Dispersion of light on double-layer particles. *Bulletin of Academy of Sciences USSR, Geophysics*. 1952;(2):15–28 (in Russian).

41. Ржонсницкая ЮБ. Моделирование рассеяния излучения неоднородной аэрозольной частицей. *Труды ГГО*. 2011;(563):102–14.

Rzhonsnitskaya YuB. Modeling the dispersion of radiation by a heterogeneous aerosol particle. *Works of GGO*. 2011;(563):102–14 (in Russian).

42. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. *Математическое моделирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Монография*. Санкт-Петербург: Издательство РГГМУ; 2012. 83 с.

Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. *Mathematical modeling of optical characteristics of an atmospheric aerosol. Monograph*. Saint-Petersburg: RGGMU publishing; 2012. 83 p. (in Russian).

43. Егоров АД, Ржонсницкая ЮБ, Потапова ИА, Саноцкая НА, Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений. *Естественные и технические науки*. 2010;(1):215–21.

Egorov AD, Rzhonsnitskaya YuB, Potapova IA, Sanotskaya NA. Determining the characteristics of an atmospheric aerosol by optical measurements' data. *Natural and technical science*. 2010;(1):215–21 (in Russian).

44. Бурштейн АИ. *Методы исследования аэрозолей*. Киев: Госмедиздат УССР; 1934. 226 с.

Burshtein AI. *Methods of research on aerosols*. Kiev: Gosmedizdat USSR; 1934. 226 p. (in Russian).

45. Спурный К, Йех Ч. *Аэрозоли*. М.: Атомиздат; 1989. 256 с.

Spurniy K, Yekh Ch. *Aerosols*. Moscow: Atomizdat; 1989. 256 p. (in Russian).

46. Коузов ПА, Скрыбина ЛЯ. *Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей*. Ленинград: Химия; 1983. 143 с.

Kouзов PA, Skryabina LYa. *Methods of determining the physical and chemical properties of industrial dusts*. Leningrad: Chemistry; 1983. 143 p. (in Russian).

47. Балаханов МВ, Карпов ОВ, Балаханов ДМ, Лесников ЕВ. Метрологическое обеспечение измерений дисперсных параметров аэрозолей и взвесей. *Нанотехнологии. Экология. Производство*. 2012;(16):102–4.

Balakhanov MV, Karpov OV, Balakhanov DM, Lesnikov EV. Meteorological assurance for measurements of aerosols' and suspensions' disperse parameters. *Nanotechnologies. Ecology. Manufacturing*. 2012;(16):102–4 (in Russian).

48. Редькина НИ. Автоматический фотоседиментометр для анализа гранулометрического состава порошков. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2001;67(3):31–7.

Red'kina NI. Automated photosedimentometer for the analysis of grain-size composition of powders. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2001;67(3):31–7 (in Russian).

49. Шишкин АС, Шишкин СФ, Илюнина ТВ. Сравнение методов фотоседиментации и лазерной дифракции при определении гранулометрического состава тонкодисперсных порошков. *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I международной интерактивной научно-практической конференции, Екатеринбург 2011, 13–19 декабря 2011, Екатеринбург*. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2012. С. 194–7.

Shishkin AS, Shishkin SF, Ilyunina TV. Comparison of methos of photosedimentation and laser diffraction when identifying the grain-size composition of fine powders. *Innovations in material science and metallurgy: materials of I International interactive research to practice conference, 13–19 December 2011, Yekaterinburg*. Yekaterinburg: Ural university publishing; 2012. P. 194–7 (in Russian).

50. Клименко АП. *Методы и приборы для измерения концентрации пыли*. М.: Химия; 1978. 207 с.

Klimenko AP. *Methods and devices to measure dust concentration*. Moscow: Chemistry; 1978. 207 p. (in Russian).

51. Бельский ДИ, Балаханов ДМ, Магомедов ТМ. Обзор методов измерений массовой концентрации аэрозольных частиц. *Альманах современной метрологии*. 2018;(14):114–21.

Belen'kiy DI, Balakhnov DM, Magomedov TM. Review on the methods for measuring the mass concentration of aerosol particles. *Almanach of modern metrology*. 2018;(14):114–21 (in Russian).

52. Шувалов ГВ, Минин ОВ, Минин ИВ, Зонов АД. *Методика измерений размеров частиц аэрозолей на системе «Квантимет 720»*. Доступ:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniy-razmerov-chastits-aerozoley-na-sisteme-kvantimet-720>

Shuvalov GV, Minin OV, Minin IV, Zonov AD. *Methodology of measuring aerosols' particle size with "Kvantimet 720" system*. Available from:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniy-razmerov-chastits-aerozoley-na-sisteme-kvantimet-720> (in Russian).

53. Heath J. *Dictionary of microscopy*. Wiley-VCH; 2005. 358 p.

54. Гаврилова НН, Назаров ВВ, Яровая ОВ. *Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов*. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева; 2012. 52 с.

Gavrilova NN, Nazarov VV, Yarovaya OV. *Micriscopic methods to identify the particle size of disperse materials*. Moscow: RHTU named after D.I. Mendeleev; 2012. 52 p. (in Russian).

55. Коузов ПА. *Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов*. Ленинград: Химия; 1987. 246 с.

- Kouзов PA. *Basics of analyzing the particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1987. 246 p. (in Russian).
56. Hagen T, Don R. Aerosol optical properties calculated from size distribution measurements: An uncertainty study. *Aerosol Science and Technology*. 2023;57(7):597–607.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2023.2202703>
57. Webb RH. Theoretical basis of confocal microscopy. *Methods in enzymology*. 1999;307:3–20.
58. Брянский ЛН, Дойников АС, Крупин БН. *Метрология. Шкалы, эталоны, практика*. М.: ВНИИФТРИ; 2004. 222 с.
- Bryansky LN, Doinikov AS, Krupin BN. *Metrology. Scales, etalons, practice*. Moscow: VNIIFTRI; 2004. 222 p. (in Russian).
59. Шеломенцев ИГ, Гомзикова ЕА. Перспективы анализа наночастиц в составе аэрозоля методом электронной микроскопии. *Гигиена и санитария*. 2023;102(3):259–64.
<https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264>
- Shelometsev IG, Gomzikova EA. Prospects of analyzing of nanoparticles in the composition in aerosol by the method of electro microscopy. *Hygiene and Sanitation*. 2023;102(3):259–64 (in Russian).
<https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264>
60. Долматов АВ, Маклаков СС, Гаранов ВА, Беляйков ИН, Петров ДА, Ширяев АО, Осипов АВ, Старостенко СН. Учет формы частиц наполнителей композиционных материалов при гранулометрическом анализе для оценки диэлектрической проницаемости. *Современная электродинамика*. 2023;1(3):10–6.
- Dolmatov AV, Maklakov SS, Garanov VA, Belyaikov IN, Petrov DA, Shiryaev AO, Osipov AV, Starostenko SN. Studying the shape of a filler of a composite material during granulometric analysis, to evaluate the permittivity value. *Modern electrodynamics*. 2023;1(3):10–6 (in Russian).
61. Дорофеев НН, Андриевская ИА, Удовиченко ОА. Современные возможности и перспективы конфокальной лазерной сканирующей микроскопии в морфологических исследованиях (обзор литературы). *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. 2021;(81):135–41.
<https://doi.org/10.36604/1998-5029-2021-81-135-143>
- Dorofeenko NN, Andrievskaya IA, Udovichenko OA. Current opportunities and prospects of confocal laser scanning microscopy in morphological research (review). *Bulletin Physiology and Pathology of Respiration*. 2021;(81):135–41 (in Russian).
<https://doi.org/10.36604/1998-5029-2021-81-135-143>
62. Pérez JMM, Pascau J. *Image Processing with ImageJ*. Packt Publishing; 2013, 126 p.
63. Азаров ВН, Ребров ВА, Козловцева ЕЮ, Азаров АВ, Добринский ДР, Тertiшников ИВ и др. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде. *Инженерный вестник Дона*. 2018;(2):1–13 Доступ:
<https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/4976>
- Azarov VN, Rebrov VA, Kozlovtsseva EYu, Azarov AV, Dobrinsky DR, Tertishnikov IV, et al. On the improvement of the computer program algorithm to analyze the particle size distribution of dusts in the air. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018;(2):1–13. Available from:
<https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/4976> (in Russian).
64. Беляев СП, Никифорова НК, Смирнов ВВ, Щелчков ГИ. *Опτικο-электронные методы изучения аэрозолей*. М.: Энергоиздат; 1981. 232 с.
- Belyayev SP, Nikiforova NK, Smirnov VV, Schelchikov GI. *Optic electronic methods of aerosol emission*. Moscow: Energoizdat; 1981. 232 p. (in Russian).
65. Калечиц ВИ. Счетчики частиц и их основные характеристики. *Чистые помещения и технологические среды*. 2009;(1):2–7.
- Kalechits VI. Particle counters and their general features. *Clean enclosures and technological media*. 2009;(1):2–7 (in Russian).
66. Gautam P, Gautam P, Moosmüller H, Maughan J, Sorensen C. Light scattering from spherical and irregular particles over a wide angular range. *Aerosol Science and Technology*. 2024;58(9):1053–62.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2024.2338543>
67. Castellanos P, Colarco P, Espinosa W, Guzewish S, Levy C, Miller R, et al. Mineral dust optical properties for remote sensing and global modeling: a review. *Remote Sens Environ*. 2024;(303):113982.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113982>
68. Ceolato R., Berg M. Aerosol light extinction and backscattering: a review with a lidar perspective. *J. Quant. Spectrosc Radiat Transf*. 2021;262:107492.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107492>
69. Maughan J, Sorensen S. Universal parameter to describe the reduction of refraction effects in the scattering of absorbing spheres. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 2020;37(9):1456–64.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.394401>

70. Grubbs J., Tsaknopoulos K., Massar C., Young B., O'Connell A., Walde C., et al. Comparison of laser diffraction and image analysis techniques for particle size-shape characterization in additive manufacturing applications. *Powder Technology*. 2021; (391):20-33.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.003>
71. Багдюн АА, Макаревич ВБ, Филистович ЕВ, Горошкова АН, Ивашенко ДВ. Эталонный комплекс для средств измерений параметров дисперсных сред. *Метрология и приборостроение*. 2021;(4):4–8.
Bagdyun AA, Makarevichi VB, Filistovich EV, Goroshkova AN, Ivashenko DV. Reference complex for measuring the parameters of dispersion media. *Metrology and instrumentation*. 2021;(4):4–8 (in Russian).
72. Шидловский АА. *Основы пиротехники*. М.: Машиностроение; 1973. 20 с.
Shidlovsky AA. *Basics of Pyrotechnics*. Moscow: Mashinostroenie; 1973. 320 p. (in Russian).
73. Чекман ИС. *Аэрозоли – дисперсные системы: Монография*. Харьков: «Цифрова друкарня № 1»; 2013. 101 с.
Chekman IS. *Aerosols – disperse system: Monograph*. Char'kov: "Tsifrova drukarnya No. 1"; 2013. 101 p. (in Russian).
74. Рахимов М, Макиенко ЭВ, Панченко МВ. Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников. *Оптика атмосферы и океана*. 2010;(8):675–83.
Rakhimov M, Makienko EV, Panchenko MV. Optical-microphysical properties of mixed smokes from several separated sources. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2010;(8):675–83 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **В.Д. Иванов** – формирование концепции статьи, сбор, анализ и систематизация информации, изложенной в научной литературе, написание текста, редактирование рукописи, критические обсуждения материалов статьи; **В.П. Хантов** – критические обсуждения материалов статьи; **Р.С. Лошманов** – анализ данных научной литературы. / All the authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions were as follows. **V.D. Ivanov** – elaboration of the concept of the paper; collection, analysis and systematization of scientific literature; writing and editing of the article, critical discussion of the article; **V.P. Khantov** – critical discussion of the article; **R.S. Loshmanov** – analysed scientific literature.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации, 156013, Костромская область, г. Кострома, ул. Горького, д. 16.

Иванов Владимир Дмитриевич. Научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории.

Хантов Вячеслав Павлович. Начальник кафедры, канд. хим. наук, доцент.

Пошманов Роман Сергеевич. Начальник научно-исследовательской лаборатории, канд. техн. наук.

Контактная информация для всех авторов: varhbz@mil.ru
Контактное лицо: Иванов Владимир Дмитриевич; varhbz@mil.ru

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation, 16, Gorky St., Kostroma 156015, Russian Federation.

Vladimir D. Ivanov. Researcher of Research Laboratory.

Vyacheslav P. Khantov, Head of Department, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor.

Roman S. Loshmanov. Head of Research Laboratory. Cand. Sci. (Techn.).

Contact information for all authors: varhbz@mil.ru

Contact person: Vladimir D. Ivanov; varhbz@mil.ru



Компьютерное моделирование распространения в атмосфере антропогенных загрязнений

А.М. Флеер, А.С. Сипаков, Ю.И. Хрипков✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации,
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Основные моменты

- Приоритетное значение имеет моделирование регионального переноса опасных веществ, особенно в контексте угрозы применения химического и биологического оружия, что требует принципиально новых вычислительных подходов.

- Выявлен системный кризис в моделировании: традиционные методы исчерпали потенциал для крупномасштабных задач, а переход к компьютерному прогнозированию сдерживается отсутствием специализированного ПО и методологических решений.

Актуальность. Исследование закономерностей атмосферного рассеяния примесей приобретает критическую важность в условиях роста антропогенного загрязнения и потенциальных угроз применения химического и биологического оружия, аварий на РХБОО, совершения терактов (диверсий). Развитие вычислительных технологий открывает новые возможности для моделирования этих процессов.

Цель работы – комплексный анализ современных методов математического моделирования распространения антропогенных загрязнений в атмосфере.

Источниковая база исследования. Научные публикации из Google Scholar и Российской электронной библиотеки, а также авторские разработки.

Метод исследования. Аналитический.

Обсуждение. Катастрофический рост загрязнения, особенно в урбанизированных зонах, требует совершенствования методов прогнозирования. Особую актуальность это приобретает в контексте возможного применения аэрозольных форм химического и биологического оружия. Компьютерное моделирование позволяет решать ранее недоступные задачи прогнозирования.

Выводы. Существующие модели эффективны для локальных расчетов (до нескольких километров), но требуют развития для региональных масштабов и особенно в условиях большого города. Ключевым ограничением является недостаток специализированного ПО. Исследователям необходимо выбирать между адаптацией существующих методик и разработкой новых решений.

Ключевые слова: антропогенные загрязнения; атмосферная диффузия; источник примеси; компьютерное моделирование; математическое моделирование; масштаб распространения загрязнителя; прогнозирование; система дифференциальных уравнений 2-го порядка в частных производных; численные методы

Для цитирования: Флеер А.М., Сипаков А.С., Хрипков Ю.И. Компьютерное моделирование распространения в атмосфере антропогенных загрязнений. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):263–278. EDN:vctcvj.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-263-278>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 12.03.2025 г. После доработки 20.05.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Computer simulation of the spread of anthropogenic pollutants in the atmosphere

Aleksandr M. Fleer, Aleksandr S. Sipakov, Yurii I. Khripkov✉

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

- Modeling the regional transport of hazardous substances is of paramount importance, particularly in the context of chemical/biological weapons threats, necessitating fundamentally new computational approaches.
- The analysis revealed a systemic crisis in modeling: traditional methods have exhausted their potential for large-scale tasks, while the transition to computer-based forecasting is hindered by a lack of specialized software and methodological solutions.

Relevance. The study of atmospheric dispersion patterns of pollutants has become critically important amid increasing anthropogenic pollution and potential threats of chemical/biological weapons use, accidents at nuclear chemical and biological hazardous facilities, terrorist attacks, and sabotage. Advances in computational technologies offer new opportunities for modeling these processes.

Purpose of the study is to a comprehensive analysis of modern mathematical modeling methods for atmospheric dispersion of anthropogenic pollutants.

Study base sources. An analytical review of scientific publications from Google Scholar and the Russian Electronic Library, supplemented by the authors' own developments.

Method. Analytical.

Discussion. The catastrophic increase in pollution, especially in urbanized areas, calls for improved forecasting methods. This is particularly relevant in the context of potential aerosol-based chemical/biological weapons use. Computer modeling enables solutions to previously intractable forecasting challenges.

Conclusions. Existing models are effective for local-scale calculations (up to several kilometers) but require development for regional scales and especially in large city conditions. A key limitation is the shortage of specialized software. Researchers must choose between adapting existing methodologies and developing new solutions..

Keywords: anthropogenic pollution; atmospheric diffusion; computer modeling; forecasting; impurity source; mathematical modeling; numerical methods; scale of pollutant spread; system of 2nd order partial differential equations

For citation: Fleer A.M., Sipakov A.S., Khripkov Yu.I. Computer simulation of the spread of anthropogenic pollutants in the atmosphere. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):263–278. EDN:/vctcvj.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-263-278>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF)

Received March 12, 2025. Revised May 20, 2025. Accepted September 27, 2025.

Область исследований, появившаяся на стыке гидромеханики, геофизики, метеорологии, некоторых других наук и названная по предложению академика А.С. Монины «Атмосферная диффузия»¹, как самостоятельное направление развивается уже более 100 лет.

¹ Монин А.С. Атмосферная диффузия. *Успехи физических наук.* 1959;67(1):119–30.

Существует мнение, что ее возникновение связано с необходимостью прогнозирования последствий применения химического оружия, особенно широко распространившегося во время Первой мировой войны. С течением времени сфера использования полученных в данном направлении результатов расширялась, приобретая особую значимость вследствие резкого увеличения загрязнения воздуха различными веществами антропогенного происхождения (выбросы промышленных предприятий, объектов энергетики, выхлопные газы автомобильного транспорта, аварийное поступление вредных примесей в атмосферу и т.п.). Однако за весь период проведения исследований в этой области (а ими занимались как с прикладной, так и с теоретической точек зрения) разрабатываемые математические модели до настоящего времени завершеного вида еще не приобрели. Более того, не устранены разногласия при выборе единого подхода к решению возникающих в данном направлении задач. Важными факторами в сложившейся ситуации являются также недостаточное качество количественных результатов проводимых экспериментов, сложность выбора и получения и полного набора исходных данных для верификации рассчитываемых показателей.

Прогноз обстановки по различным сценариям развития ситуаций при возможной реализации современного комплекса угроз, связанных с внесением в окружающую среду различных загрязнителей, необходим и военным, и гражданским специалистам. Получаемая при этом информация используется, например, для решения следующих задач:

- в военной сфере
 - оптимизация структуры, состава и мест дислокации частей и подразделений войск РХБ защиты ВС РФ;
 - выявление масштабов, опасности и продолжительности последствий возможной реализации угроз;
 - принятие решений на осуществление мероприятий РХБ защиты;
 - оценка потребности в материально-технических ресурсах;
- в гражданской сфере [1, 2]
 - принятие эффективных управленческих решений по обеспечению безопасности в различных областях;
 - обеспечение устойчивости объектов в условиях чрезвычайных ситуаций;
 - обоснование мер защиты;
 - выявление приоритетов при распределении финансовых, материальных, людских ресурсов на обеспечение безопасности (заниженная оценка приведет к возрастанию по-

терь, а завышенная – к снижению экономической эффективности производства);

- решение вопросов размещения радиационно, химически и биологически опасных объектов;

- информирование общественности, обеспечения размещением источников опасности;

- при страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на нем.

Цель исследования – комплексный анализ современных методов математического моделирования распространения антропогенных загрязнений в атмосфере.

Источниковая база исследования. Научные публикации из Google Scholar и Российской электронной библиотеки, а также авторские разработки.

Метод исследования. Аналитический.

Задачи работы:

- определение тенденций развития математического моделирования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений;

- исследование практических достижений в области прогнозирования загрязнения атмосферы с использованием современной вычислительной техники.

Основные способы получения аналитических решений

В настоящее время для целей прогнозирования последствий распространения в воздухе паров (газов) и аэрозолей различной природы используются несколько типов уравнений, в разной степени получивших теоретическое и экспериментальное обоснование. При этом убедительных аргументов о предпочтительности того или иного варианта, как правило, не представляется и любой из них может быть обоснованно раскритикован. Ниже рассмотрим основные из существующих подходов к решению этой проблемы.

Широкое распространение на начальных этапах исследования закономерностей распространения различных загрязнителей в атмосфере получило представление о том, что распределение переносимой воздушным потоком примеси вблизи точечного источника в разных направлениях является гауссовским (достигнутые к началу 1950-х гг. в развитие этой гипотезы результаты были обобщены в работе О.Г. Сеттона [3]). В последствии многими специалистами, среди которых особо отметим представителей Института экспериментальной метеорологии, это направление в течение некоторого периода совершенствовало-

лось и в итоге последними была разработана (по их терминологии) «усовершенствованная статистическая модель» [4–6].

Вместе с этим, вследствие, например, недостаточного теоретического обоснования данного направления, получил развитие подход, основанный на решении так называемого полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Литературные источники содержат несколько вариантов его записи, но в наиболее общем виде для мгновенного точечного источника монодисперсного аэрозоля оно имеет следующий вид [7, 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda \cdot C = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

где C – концентрация примеси;

U, V, W – продольная, поперечная и вертикальная составляющие скорости ветра;

λ – коэффициент, учитывающий разложение примеси;

x, y, z – оси декартовой системы координат;

t – время диффузии;

K_x, K_y, K_z – составляющие коэффициента турбулентной диффузии примеси по соответствующим осям координат.

В научной среде общепризнанным является утверждение, что данное уравнение аналитически не решается. Руководствуясь принципом, что лучше иметь приблизительный прогноз, чем не иметь никакого, исследователи для достижения результата используют различные приемы. Перечислим, например, наиболее часто встречающиеся способы упрощения уравнения (1):

- если рассматривать не мгновенный, а непрерывный источник примеси, то $\partial C / \partial t = 0$ (при обратном переходе после получения решения вместо установившейся концентрации примеси можно рассматривать численно равную ей интегральную концентрацию примеси от мгновенного источника);

- если ось x ориентирована по ветру, то $V=0$;

- подстилающая поверхность ровная и однородная, полностью поглощает или отражает примесь;

- вертикальной составляющей скорости ветра можно пренебречь. В этом случае под W понимают скорость гравитационного оседания (для невесомой примеси она равна 0);

- перенос загрязнителей воздушным потоком по направлению ветра преобладает над турбулентной диффузией вдоль соответствующей оси координат;

$$U \frac{\partial C}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x},$$

отсюда следует, что

$$\frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} \approx 0;$$

- примесь не разлагается ($\lambda=0$);

- вместо точечного источника рассматривают линейный бесконечной длины, ориентированный перпендикулярно направлению ветра (это позволяет пренебречь рассеянием примеси в поперечном ветру направлении);

- замена реальных профилей скорости ветра и составляющих коэффициента турбулентной диффузии средними величинами.

Перечисленные допущения, как и любые другие, могут использоваться в любом сочетании, наиболее удобном для каждого рассматриваемого случая. Конечным результатом таких действий является получение расчетной формулы, например, для оценки концентрации примеси, создаваемой определенным источником в различных условиях.

Базовой является математическая модель мгновенного точечного источника монодисперсного неоседающего аэрозоля. При этом вариантов аппроксимации реальных источников примеси может быть достаточно много. Пример их классификации представлен в таблице 1.

Кроме указанных в ней признаков, могут быть учтены и некоторые другие – в частности, агрегатное состояние примеси.

Переход от мгновенного точечного источника к другим осуществляется с помощью стандартного приема: представлением любого из них совокупностью мгновенных точечных источников во времени и (или) пространстве и использования принципа суперпозиции, когда суммарная концентрация примеси в точке равна сумме концентраций от отдельных источников [8, 9]. Схема такого перехода от мгновенного точечного источника к стационарному точечному источнику конечного времени действия представлена на рисунке 1, а пояснения к нему – по тексту.

На нем время работы генератора (t_p) разделено на 7 интервалов, продолжительность каждого из которых составляет $\Delta t = t_p / 7$. В середине каждого из этих интервалов происходит срабатывание мгновенного точечного источника мощностью $Q/7$, где Q – общее количество примеси, выбрасываемое источником.

В произвольной точке A на некий заданный момент времени t_3 будет наблюдаться следующая картина: облака аэрозоля, созданные источниками 1, 2, ее уже пройдут; облака, образованные источниками 6, 7, до

Таблица 1 – Классификация источников примеси
Table 1. Classification of Impurity Sources

Признак / Feature	Градации признака / Feature gradations
Размер источника / Source size	Точечный; линейный; плоский; объемный / Point; linear; flat; volumetric
Время действия / Time of action	Мгновенный; конечного времени действия; непрерывный / Instantaneous; finite duration; continuous
Высота образования / Height of formation	Наземный; приземный; высотный / Ground; ground; high-altitude
Природа примеси / Nature of the impurity	Химическая; биологическая; радиоактивная / Chemical; biological; radioactive
Состав примеси / Composition of impurities	Монодисперсный; полидисперсный / Monodisperse; polydisperse
Размер частиц / Particle size	Газ (пар); тонкодисперсный аэрозоль; грубодисперсный аэрозоль / Gas (vapor); fine aerosol; coarse aerosol
Примечание. Таблица составлена авторами. Note. The table was compiled by the authors.	

нее еще не дойдут; концентрация в ней будет равна сумме концентраций, образованных на данный момент времени источниками 3, 4, 5. При увеличении количества мгновенных точечных источников, аппроксимирующих источник конечного времени действия, схема расчета сохранится, а суммирование может быть заменено интегрированием.

Наиболее значимые результаты в направлении, связанном с решением уравнения (1), по нашему мнению, достигнуты специалистами Главной геофизической обсерватории

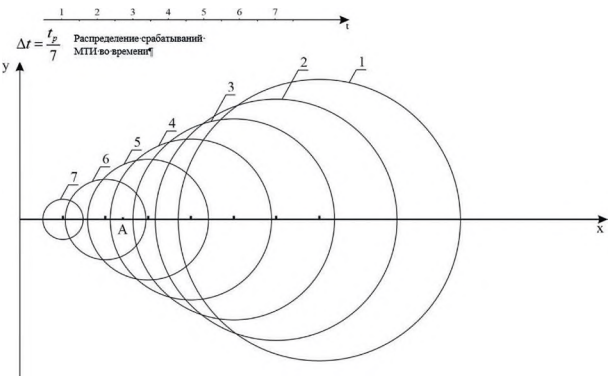


Рисунок 1 – Схема формирования концентрации примеси от источника конечного времени действия при его аппроксимации 7 последовательно срабатывающими мгновенными источниками в момент времени $t_3 > t_p$ (рисунок составлен по данным авторов)
Figure 1: Diagram of pollutant concentration formation from a finite-duration emission source approximated by 7 sequentially activated instantaneous sources at time $t_3 > t_p$ (figure compiled based on the authors' data)

² ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеиздат; 1981. 202 с.

им. А.И. Воейкова [8, 10]. Так, ими разработана методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, известная как ОНД-86² и до сих пор используемая для проведения официальных расчетов в данной области.

Перечисленные решения, как и любые другие, им подобные, полученные на сравнительно ранних этапах развития исследований рассеяния примесей в атмосфере, не лишены определенных и хорошо известных недостатков. К последним, в частности, относятся:

- применение упомянутых выше допущений, связанных с упрощением исходного уравнения (1), приводящее к системным ошибкам в расчетах;
- игнорирование случайной природы моделируемых процессов;
- использование вместо профилей скорости ветра и составляющих коэффициента турбулентной диффузии их осредненных величин по некоторому слою или значения на высоте источника;
- отсутствие учета поступления в атмосферу вторичного аэрозоля (за счет испарения, ветрового подъема) совместно с первичным;
- усредненный подход к влиянию элементов рельефа, городской застройки;
- необходимость принятия дополнительных гипотез для учета теплового подъема начального аэрозольного облака;
- недостаточно корректный учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью,
- а также некоторые другие.

Одним из проблемных вопросов при получении и использовании результатов в рассмотренных вариантах является учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. Поскольку данная задача имеет чрезвычайно важное теоретическое значение, ее решение выполнил академик А.С. Монин [11]. Введенный им в рассмотрение параметр β характеризует взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью (его иногда называют коэффициентом аккомодации). Данный параметр вошел в разработанную А.С. Мониним математическую модель. Она выгодно отличалась от существующих тем, что учитывала взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью в широком диапазоне, а не только лишь крайние случаи – ее полное поглощение или отражение. Однако использование параметра β в расчетах было недоступно в силу его теоретического характера. Такая возможность появилась после того, как И.Л. Кароль [12] получил соотношение для его определения. С учетом данного обстоятельства, были разработаны методики проведения расчета концентраций (доз) и других характеристик при рассеивании в турбулентной атмосфере аэрозолей различной природы³. Здесь важно отметить, что в предельных случаях – полное поглощение или отражение примеси подстилающей поверхностью – модель А.С. Монина принимает вид предшествовавших ей уравнений.

Результатом использования перечисленных выше математических моделей (а также других, им подобных) будет расчетное поле приземных концентраций загрязнителя. Схематично оно будет выглядеть так, как это представлено на рисунке 2.

Вместе с этим, для своего практического использования, а также, что крайне важно, проведения на их основе дальнейших аналитических исследований (которые необходимы, в частности, для нужд войск РХБ защиты ВС РФ) разработанные математические модели являлись чересчур громоздкими. С целью упрощения сотрудники кафедры № 8 ВАХЗ [13] модифицировали базовую модель мгновенного точечного источника, заменив сложную функцию распределения примеси по оси абсцисс логарифмически-нормальным законом. Это дало возможность аналитического определения ряда дифференциальных и интегральных показателей распространения и выседания на

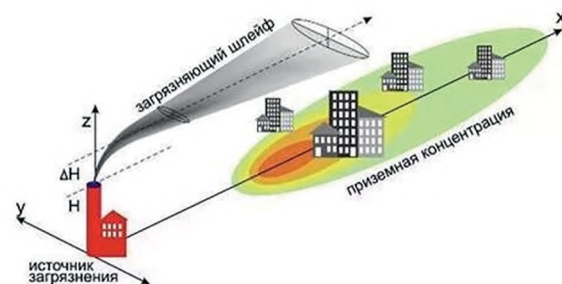


Рисунок 2 – Схематичное изображение поля приземных концентраций, формируемое непрерывным точечным источником (рисунок с сайта. URL: https://yandex.ru/images/search?pos=12&img_url=https%3A%2F%2Fpandia.org%2Ftext%2F78%2F223%2Fimages%2Fimage001_270.jpg&text=численный+расчет+загрязнений+от+точечного+источника+примеси&lr=213&rpt=simage&source=serp; дата обращения: 05.05.2024)

Figure 2: Schematic representation of ground-level concentration field formed by a continuous point source (image source: URL: https://yandex.ru/images/search?pos=12&img_url=https%3A%2F%2Fpandia.org%2Ftext%2F78%2F223%2Fimages%2Fimage001_270.jpg&text=численный+расчет+загрязнений+от+точечного+источника+примеси&lr=213&rpt=simage&source=serp; accessed: 05.05.2024)

подстилающую поверхность аэрозолей различной природы и дисперсности. При этом необходимо пояснить, что упомянутый логарифмически-нормальный закон, а также широко применяемый в рассматриваемых нами моделях нормальный закон (например, для описания продольного, поперечного и вертикального распределений примеси) в данной ситуации не являются собственно законами распределения случайной величины, в частности, концентрации примеси, а формами ее детерминированного описания.

Следует отметить, что модель А.С. Монина и разработанные на ее основе методики для проведения практических расчетов также не лишены ряда недостатков. Часть из них унаследована от более ранних уравнений атмосферной диффузии (например, вследствие непреодолимых до настоящего времени математических трудностей), а другая часть является вновь приобретенными (связанными с предложенным И.Л. Каролем способом расчета параметра β). Основные нарекания связаны с возникающими погрешностями конечных результатов вследствие неизбежных

³ Шукалин П.Н. Методы расчета концентраций (доз) и других характеристик при рассеивании в турбулентной атмосфере аэрозолей различной природы. *Материалы международного аэрозольного симпозиума «Аэрозольные технологии», 21–25 марта 1994 г. М.: НИФХИ; 1994.*

упрощений в процессе математической формулировки решаемой задачи для приведения ее к виду, позволяющему получать аналитические решения с использованием имеющегося математического аппарата.

Численные методы моделирования рассеяния примеси в атмосфере

Для устранения некоторых из перечисленных претензий академик Г.И. Марчук с коллегами в 80-х гг. прошлого века [14, 15] обобщил результаты исследований по поиску нового подхода к решению данной проблемы, основанному на численном решении исходного дифференциального полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии (которая включает в себя атмосферную диффузию). Это стало возможным благодаря развитию электронно-вычислительной техники и появлению высокопроизводительных компьютеров (сегодня мы уже говорим о суперкомпьютерах). Дальнейшее развитие данного подхода представлено, например, в работе [16], выполненной последователями Г.И. Марчука. Вариант его применения в практических приложениях при прогнозировании распространения радиоактивных аэрозолей представлен в работе [17].

Существенным фактором при разработке математической модели и ее параметризации является выбор масштаба ожидаемого распространения загрязнителя. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения и учета соответствующих атмосферных процессов – например, из следующих соображений.

Если примесь выброшена в больших количествах и на значительную высоту (извержение вулкана, взрыв сверхкрупного ядерного боеприпаса, глобальная катастрофа), следует ожидать ее макромасштабного распространения (более 1000 км) с участием синоптических процессов.

При рассмотрении чрезвычайных ситуаций регионального масштаба – мезомасштабных (от 10 до 1000 км), кроме синоптических процессов, необходимо учитывать влияние подстилающей поверхности (рельеф, водоемы, растительность, городская застройка). Другими словами, необходим учет метеорологических величин.

Для местных (микромасштабных) – менее 10 км – аварий и других подобных ситуаций достаточно учитывать процессы, обусловленные влиянием подстилающей поверхности и погоды. При этом очевидно, что каждому из перечисленных выше масштабов рассматриваемого процесса можно поставить в соответствие его продолжительность – тогда в первом случае можно говорить о не-

делях, во втором – о сутках, в третьем – о часах. Отметим, что у разных авторов количественные критерии качественной градации масштабов распространения примеси (соответственно, и продолжительности) могут несколько отличаться.

При математическом моделировании микромасштабных процессов без особой погрешности для точности расчетов можно принять, что они протекают в пределах одной воздушной массы. В этом случае появляется основание считать, например, направление и скорость ветра (как и другие метеорологические величины, учитываемые при расчетах) постоянными на всем протяжении распространения облака примеси. Подстилающую поверхность на этой территории можно принять однородной. Другие варианты предполагают необходимость учитывать и вертикальную, и горизонтальную неоднородность атмосферы (например, при переходе примеси из одной воздушной массы в другую существенно изменяются метеорологические величины и их градиенты, влияющие на перенос и турбулентную диффузию загрязнителя), возможное вымывание аэрозоля из атмосферы осадками, наличие или отсутствие инсоляции, некоторые другие факторы. Здесь же отметим, что все перечисленные выше математические модели разработаны именно для микромасштабных процессов.

Практические решения задач по математическому моделированию распространения примеси от различных источников тем или иным способом должны учитывать, что в начальном аэрозольном облаке могут присутствовать частицы широкого диапазона размеров (полидисперсная примесь) – как, например, при ядерном взрыве. Однако со временем самые крупные из них выседают на подстилающую поверхность под действием силы тяжести и в воздухе остается так называемая неоседающая примесь (частицы размером до 5–10 мкм). Одновременно необходимо принять во внимание, что в процессе витания по тем или иным причинам находящиеся в воздухе вещества могут распадаться, вступать в химические реакции (например, с атмосферной влагой), конденсироваться, коагулировать, испаряться. Это особенно заметно при мезо- и макромасштабных процессах.

В зависимости от конечной цели прогнозирования, математическое моделирование процесса распространения примеси от заданного источника может быть направлено на:

– сравнение создаваемой источником максимальной концентрации загрязнителя с предельно допустимой;

- Компьютеризация процесса моделирования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений является требованием времени и, несомненно, содержит в себе ряд очевидных достоинств. Наиболее простым вариантом реализации данного подхода в рамках микромасштабного процесса, по нашему мнению, является следующий. Выбирается из существующих или разрабатывается собственная аналитическая модель источника примеси и на ее основе составляется компьютерная программа для расчета необходимого набора показателей. Возможно использование дополнительных функций – таких как учет с помощью введения соответствующих поправок влияния рельефа,

Первый шаг в использовании численных методов очевиден – исходные данные для решения задачи и параметры остаются прежними, задаются начальные и граничные условия и осуществляется процесс решения

Table 2. Advantages and limitations of impurity concentration determination methods

⁴ Чернявский С.А. Исследование трансформации химических примесей в атмосфере и оценка экологического риска как условие повышения информативности системы мониторинга. Дис. ... канд. техн. наук. М.; 2015. 136 с.

Продолжение таблицы 2

Критерий / Criterion	Способ определения концентрации примеси / Method for Determining Impurity Concentration	
	Аналитический / Analytical numerical	Численный / Numerical
Недостатки / Disadvantages	<ul style="list-style-type: none">– невозможность получения точного решения (для мезо- и макромасштабных процессов) и приближенного / impossibility of obtaining an exact solution (for meso- and macro-scale processes) even an approximate one;– трудность учета неоднородности подстилающей поверхности (в том числе городской застройки) / difficulty in accounting for the heterogeneity of the underlying surface (including urban development);– ограниченная область применения (определяется набором упрощений и допущений, принятых в процессе получения решения) / limited scope of application (determined by the set of simplifications and assumptions made in the solution process)	<ul style="list-style-type: none">– особые требования к вычислительной технике / special requirements for computing hardware;– необходимость постоянного совершенствования (обновления) вычислительной техники и программного обеспечения / need for continuous improvement (upgrading) of computing hardware and software;– необходимость структурной перестройки задействованных подразделений и учреждений / necessity for structural reorganization of involved departments and institutions;– повышение финансовых затрат / increased financial costs
Примечание. Таблица составлена авторами. Note. The table was compiled by the authors.		

исходного уравнения. Отметим, что численные методы решения такого рода задач начали разрабатываться еще в середине прошлого века, постоянно развиваясь и совершенствуясь. Однако неизменным остается то, что вначале осуществляется так называемая дискретизация задачи – разбиение пространства и времени на ячейки и интервалы. Здесь имеется закономерность: чем меньше элементарный участок, тем больше точность расчетов, но и одновременно растет затрачиваемое машинное время. Это – общая тенденция, но для современных, в том числе и персональных, компьютеров время проведения большинства расчетов для процессов местного масштаба достаточно мало.

Следующий шаг – рассмотрение переноса и турбулентной диффузии примеси совместно с изменением метеорологических величин и рассчитываемых на их основе параметров во времени и пространстве. При проведении расчетов, в зависимости от поставленной задачи, могут быть использованы метеорологические условия – текущие или прогнозируемые, осредненные за некоторый период времени, благоприятные, неблагоприятные или какие-либо другие. При таком подходе рассмотрения только лишь выражения (1) оказывается недостаточно и требуется дополнительное привлечение комплекса основных дифференциальных уравнений гидро- и газодинамики потоков: неразрывности, сохранения импульса и энергии. Зачастую этого также не хватает и специалисты вводят учет дополнительных процессов, происходящих в

реальных условиях – таких как фазовые переходы диффундирующей примеси, химические реакции и некоторые другие. Другими словами, рассмотрению подлежит не отдельное дифференциальное уравнение 2-го порядка в частных производных, а система уравнений, которая в зависимости от конкретной задачи может быть представлена по-разному.

Численные методы решения таких систем также постоянно совершенствуются. При этом вводимые новшества направлены на улучшение существующих и разработку новых алгоритмов действий с учетом непрерывного роста возможностей вычислительной техники. В качестве примера отдельно можно выделить параллельные компьютерные технологии, когда в расчетах одновременно участвуют несколько ЭВМ.

Личные предпочтения авторов, их финансовые возможности, используемая вычислительная техника, существование различных методов решения систем уравнений, стремление повысить точность расчетов и сократить их время привели к тому, что в настоящее время существует большое число программных продуктов для решения такого класса задач [19–27] и других. При этом, разумеется, прогноз погоды имеет не только вспомогательное, но и самостоятельное значение [28–30]. Упростить получение конечного результата помогает рассмотрение источника примеси (группы источников) в конкретных топографических, климатических и метеорологических условиях. Одновременно разработчики по большей части предусматри-

вают возможность интегрировать в свои комплексы различные дополнительные программы, разработанные в том числе и другими специалистами. Пример численного расчета изолиний концентрации сероводорода при аварийных выбросах из разрывов трубопроводов, заимствованный из работы [31], представлен на рисунке 3.

Необходимо отметить, что свои особенности имеет исследование распространения примеси в условиях города. Это конкретный рельеф местности, наличие так называемого «острова тепла», особого микроклимата города, зачастую уникальная конфигурация застройки и многие другие. Особого внимания требуют к себе рассматриваемые в этих условиях источники примеси. Так, при оценке общего качества атмосферного воздуха необходимо учитывать все основные варианты поступления в него загрязнений, к которым могут быть отнесены генерация вредных веществ трубами промышленных предприятий и объектов энергетики (при моделировании описываются непрерывными точечными источниками), автомобильным транспортом, движущимся по улицам города (непрерывные линейные источники), промышленными площадками (непрерывные плоские источники), любые другие, актуальные в рассматриваемой конкретной ситуации. Однако, если изучению подлежит отдельный аварийный выброс особо опасного загрязнителя или другая подобная чрезвычайная ситуация, такой источник может быть исследован обособленно. В связи с указанными обстоятельствами, специалисты зачастую решают данную задачу как самостоятельную. Примером здесь может служить работа [32], где

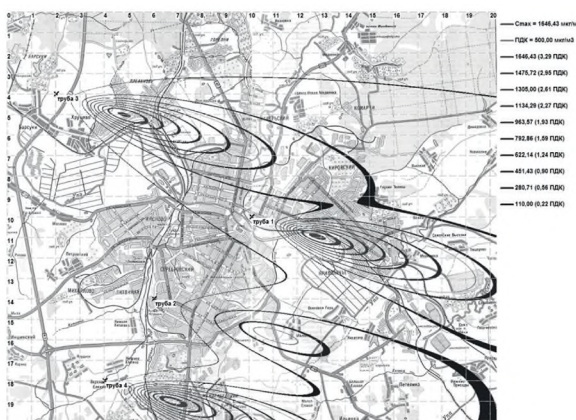


Рисунок 3 – Пример расчета полей концентраций для точечных источников (рисунок адаптирован из [31])
Figure 3: Example of concentration field calculations for point sources (figure adapted from [31])

описана разработанная авторами программа математического моделирования возможного распространения аэрозольных частиц, содержащих вирус SARS-CoV-2, в атмосфере вокруг госпиталей с учетом различных метеорологических условий, сложного рельефа местности, городской застройки различной этажности, лесных массивов, водоемов, изменяющихся метеорологических условий и множества других факторов. Некоторые варианты расчетов по ней представлены на рисунке 4.

Наибольший практический интерес, однако, представляют собой задачи, связанные с мезомасштабным переносом формируемой многими источниками примеси. Сюда, например, относится прогнозирование загрязнения атмосферы в крупном городе и окружающей его территории. Именно там проживает основная часть населения многих развитых стран и чье здоровье может подвергаться опасности. Так, например, в декабре 1930 г. в долине реки Маас (Бельгия), где концентрированно располагались предприятия тяжелой промышленности, как результат стечения нескольких обстоятельств было отмечено сильное трехдневное задымление, в продолжение которого сотни людей заболели, а 60 человек скончались (норма смертности была превышена более чем в 10 раз) [33]. Подобные случаи были отмечены и в других районах: Манчестер и Солфорд (Англия, 1931 г.), Донор (США, 1948 г.) – этот список можно было бы продолжить. Детальные исследования показали, что почти все из тех, кто умер неожиданно, страдали от бронхита, сердечных и некоторых других заболеваний.

Очевидно, что причины роста загрязненности окружающей среды кроются в создании человечеством на Земле индустриальной цивилизации. Это выражается через непрерывный рост потребления энергии, развитие промышленности, распространение автомобильного транспорта. Особенно важно то, что вся эта деятельность осуществляется непосредственно в местах компактного проживания большого количества людей или возле них. При этом загрязнение среды обитания человека в XXI в. приобретает качественно новый характер, продолжая расти количественно [34, 35]. Так, если в начале XX в. промышленность использовала 19 химических элементов, то в середине того же века – около 50, а в 1970-х гг. – практически все из известных на тот момент времени. При этом зачастую они применялись не только по отдельности, но и в составе различных химических и биохимических соединений,

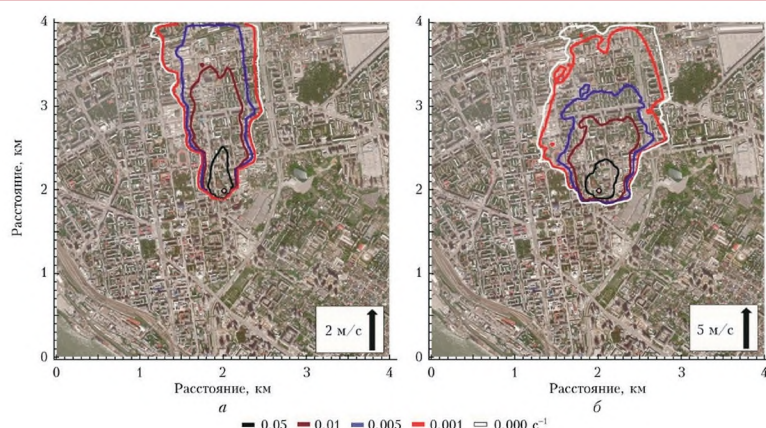


Рисунок 4 – Изолинии концентрации вируса 10^{-3} усл. ед. для коэффициентов скорости инактивации: 0,000; 0,001; 0,005; 0,010 и 0,050 s^{-1} , южное направление ветра (день): а – скорость ветра 2 м/с (январь); б – 5 м/с (июль) (по данным работы [32])

Figure 4: Virus concentration isolines (10^{-3} conv. units) for different inactivation rate coefficients: 0.000, 0.001, 0.005, 0.010, and 0.050 s^{-1} , southern wind direction (daytime conditions): а, wind speed 2 m/s (January); б, wind speed 5 m/s (July) (according to [32])

количество которых учесть практически невозможно.

Решения задачи мезомасштабного переноса примеси применительно к своим странам, а то и к конкретным городам (регионам) выполнены многими коллективами авторов [19–22, 36]. Как правило, переход к рассмотрению переноса примеси в региональном масштабе осуществляется путем совместного использования численного прогноза погоды (как исходных данных для количественного описания качества атмосферного воздуха) и математических моделей распространения загрязнителей от их источников. По мнению авторов работы [37], некоторое время назад использование таких моделей специалистами нашей страны в научной и практической работе по определенным объективным причинам имело ограниченный характер. Однако работа в этом направлении была налажена и, например, в Томском университете и Институте оптики атмосферы им. В.В. Зуева СО РАН разработана и активно развивается мезомасштабная негидростатическая модель высокого разрешения (0,5–1 км) краткосрочного прогноза погоды и качества атмосферного воздуха над крупным городом, адаптированная для г. Томска, TSUNM3 (Tomsk State University Nonhydrostatical Mesoscale Meteorological Model) [37]. Она позволяет прогнозировать, в частности, составляющие скорости ветра и температурно-влажностные характеристики в тропосфере (до 10000 м) для площади 100×100 км (горизонтальный шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 1$ км) на 24 ч. Задание начальных условий модели проводится на основе результатов численного прогноза опе-

ративной глобальной модели ПЛАВ Гидрометцентра РФ [38].

Особого рассмотрения требуют задачи, связанные с глобальным атмосферным переносом загрязнений. Их решение необходимо, например, для оценки развития ситуаций при выбросе большого количества примеси (как правило, опасной) источником, находящимся практически в любой точке земного шара. Именно такой, в частности, была авария на японской АЭС «Фукусима-1» [39]. Следует отметить, что исследования в этой области дали возможность предсказать последствие массового применения ядерного оружия, получившего в литературе название «ядерная зима». Принято считать, что именно полученные этим способом результаты позволили политикам понять, что победителя в неограниченной ядерной войне не будет. При этом очевидно, что, несмотря на важность получаемых таким образом результатов, использование соответствующих моделей будет гораздо менее интенсивным, чем мезомасштабных. Ведь ситуации, требующие применения последних, наблюдаются гораздо чаще.

В научной литературе периодически появляются обобщения достижений по данному направлению применительно к рассматриваемому авторами моменту времени (см., например, работы [15, 16, 37, 40]). В частности, специалисты отмечают, что лишь немногие страны развивают собственные технологии моделирования глобальной атмосферы – к ним относятся США, Великобритания, Канада, Франция, Япония, Германия, Австралия, Китай и Россия. При этом выявлено как расширение, так и сокращение данного

списка. Программные продукты такого рода получили у специалистов особое наименование – Computational fluid dynamics (CFD) или вычислительная гидродинамика. Они относятся к отдельно рассматриваемому классу моделей. Это совокупность физических, математических или численных методов, предназначенных для компьютерного моделирования процессов, происходящих в жидкой или газообразной среде (атмосфера, океан). Их использование возможно только при наличии суперкомпьютера и, несмотря на это, требует значительных временных ресурсов.

Для полноты картины в рассматриваемой области считаем необходимым отметить тот факт, что при проведении натурных испытаний в области рассеяния примесей в атмосфере результаты однотипных экспериментов могут существенно различаться между собой, будучи полученными в, казалось бы, практически одинаковых условиях. Это связано с тем, что по своей природе исследуемые величины – как определяемые в ходе полигонных работ, так и рассчитываемые на их основе – являются случайными. Следовательно, для их описания необходимо использовать соответствующий математический аппарат. Поисковые работы такого рода проводятся в различных научно-исследовательских организациях [41–45]. Отметим, что первые научные материалы по данному направлению появились еще в 1950-х гг. [46–49]. Вместе с этим, следует признать, что полученные в этой области результаты по различным причинам еще не доведены до рабочих методик, которые нашли бы свое применение в практических приложениях.

Заключение

Анализ приведенных материалов позволяет заключить, что к настоящему времени специалистами разработано большое количество различающихся между собой по многим признакам математических моделей распространения примесей в атмосфере. Определенные результаты в данном направлении достигнуты как в нашей стране, так и за рубежом. Если некоторое время назад это были так называемые «гауссовские модели»

или аналитические решения исходного дифференциального уравнения 2-го порядка в частных производных, полученные с использованием некоторого набора приближений и допущений, то на сегодняшний день сюда добавилось значительное число программных продуктов, основанных на численных методах расчета концентрации загрязнителей от различных источников. Последние позволяют оценивать последствия не только локального, но и регионального или глобального распространения загрязнителей в окружающей среде. Выбор оптимального для проведения вычислений варианта осуществляется, исходя из предъявляемых требований к конечному результату и имеющихся возможностей для его получения. Наиболее перспективными для практической реализации, несомненно, являются численные методы расчета.

В зависимости от поставленной цели исследования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений, специалисты изучают, по необходимости, микро-, мезо- и макромасштабные процессы. Наиболее изученными являются задачи, связанные с локальными выбросами загрязнителей. Расчету подлежат как дифференциальные, так и интегральные характеристики полей концентраций (интегральных концентраций) различных примесей, формируемых как единичными, так и множественными источниками. При этом наибольший практический интерес у специалистов вызывают ситуации, когда перенос опасных для людей газов и аэрозолей осуществляется на региональном уровне. Здесь в качестве основного варианта рассматривается большой город и его окрестности.

Таким образом, для решения практических задач в области прогнозирования последствий распространения в атмосфере загрязнений при организации РХБ защиты войск ВС РФ и населения необходимо определить цель проводимых исследований, выбрать или разработать соответствующую математическую модель и ее реализацию на ЭВМ, установить порядок получения исходных данных для ее использования и обеспечить наличие необходимой компьютерной техники.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Данная работа имеет ряд ограничений, а именно: 1) в работе были использованы источники, доступные через базы данных Google Scholar, Российской электронной библиотеки. Это может привести к смещению выборки, поскольку соответствующие исследования из других баз данных или на других языках не были включены; 2) выводы основаны на собственных материалах авторов. / This research has several inherent limitations that should be acknowledged: (1) the analysis relied exclusively on publications available through: Google

Scholar database; Russian Electronic Library collections; (2) this may introduce selection bias as relevant studies from other databases or in other languages were not included.

Список источников / References

1. Ляшенко НВ, Лепихова ВА, Вяльцев АВ. *Безопасность в чрезвычайных ситуациях, вызванных авариями с АХОВ*. Новочеркасск: Лик; 2021. 112 с.
Lyashenko NV, Lepikhova VA, Vyaltsev AV. *Safety in emergency situations caused by accidents with AHS*. Novocherkassk: Lik; 2021. 112 p. (in Russian).
2. Нафикова ЭВ, Елизарьев АН, Мусина СА, Терпигорева ИВ. *Обеспечение безопасности населения и территорий при авариях на химически опасных объектах*. Уфа: РИК УГАТУ; 2020. 126 с.
Nafikova EV, Elizariev AN, Musina SA, Terpigoreva IV. *Ensuring the safety of the population and territories in case of accidents at chemically hazardous facilities*. Ufa: RIK UGATU; 2020. 126 p. (in Russian).
3. Сеттон ОГ. *Микрометеорология*. Л.: Гидрометеиздат; 1958. 355 с.
Sutton OG. *Micrometeorology*. New York: McGraw-Hill; 1953.
4. Бызова НЛ. *Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы по метеорологическим данным*. М.: Гидрометеиздат; 1973. 46 с.
Byzova NL. *Methodological guide for calculating the scattering of impurities in the boundary layer of the atmosphere based on meteorological data*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1973. 46 p. (in Russian).
5. Бызова НЛ. *Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы*. М.: Гидрометеиздат; 1974. 191 с.
Byzova NL. *Scattering of impurities in the boundary layer of the atmosphere*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1974. 191 p. (in Russian).
6. Бызова НЛ, Гаргер ЕК, Иванов ВН. *Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси*. Л.: Гидрометеиздат; 1991. 280 с.
Byzova NL, Garger EK, Ivanov VN. *Experimental studies of atmospheric diffusion and calculations of impurity scattering*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 280 p. (in Russian).
7. Монин АС, Яглом АМ. *Статистическая гидромеханика. Ч. 1*. М.: Наука; 1965. 638 с.
Monin AS, Yaglom AM. *Statistical hydromechanics. Part 1*. Moscow: Nauka; 1965. 638 p. (in Russian).
8. Берлянд МЕ. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 448 с.
Berland ME. *Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 448 p. (in Russian).
9. Вителис ВМ., Каинов Ю.Н., Киреев В.А. *Методы расчетного определения ущерба при применении вероятным противником химического и зажигательного оружия. Часть 2. Методы оценки характеристик поражающего действия химических боеприпасов и приборов вероятного противника*. М.: ВАХЗ; 1985. 135 с.
Witelis VM, Kainov YuN, Kireev VA. *Methods for calculating damage caused by the use of chemical and incendiary weapons by a likely enemy. Part 2. Methods for assessing the characteristics of the damaging effect of chemical munitions and devices of a likely enemy*. Moscow: VACHZ; 1985. 135 p. (in Russian).
10. Берлянд МЕ. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат; 1985. 272 с.
Berland ME. *Forecast and regulation of atmospheric pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 272 p. (in Russian).
11. Монин АС. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии. *Труды Геофизического института АН СССР*. 1956;(33):3–47.
Monin AS. Semi-empirical theory of turbulent diffusion. *Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences*. 1956;(33):3–47 (in Russian).
12. Кароль ИЛ. О влиянии приземного слоя атмосферы на распространение тяжелой однородной примеси из высотного мгновенного точечного источника. *Изв АН СССР, сер. геофиз.* 1959;(7):1079–84.
Karol IL. On the influence of the surface layer of the atmosphere on the spread of a heavy homogeneous admixture from a high-altitude instantaneous point source. *Izvestiya AN SSSR, ser. geofiz.* 1959;(7):1079–84 (in Russian).
13. Гагарин МВ, Кармишин АМ, Кравченко ОП. *Теория поражающего действия ОМП*. М.: ВАХЗ; 1995. 152 с.
Gagarin MV, Karmishin AM, Kravchenko OP. *Theory of the destructive effect of weapons of mass destruction*. Moscow: VACHZ; 1995. 152 p. (in Russian).
14. Марчук ГИ. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. М.: Наука; 1982. 320 с.
Marchuk GI. *Mathematical modeling in the problem of the environment*. Moscow: Nauka; 1982. 320 p. (in Russian).

15. Пененко ВВ, Алоян АЕ. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука; 1985. 256 с.
- Penenko VV, Aloyan AE. *Models and methods for environmental protection tasks*. Novosibirsk: Nauka; 1985. 256 p. (in Russian).
16. Алоян АЕ. *Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере*. М.: Наука; 2008. 415 с.
- Aloyan AE. *Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere*. Moscow: Nauka; 2008. 415 p. (in Russian).
17. Лоборев ВМ, ред. Т. 1. Развитие взрыва. В: Анисимов АВ, ред. *Физика ядерного взрыва. В 5 т.* М.: Физматлит; 2009. 832 с.
- Loborev VM, Vol. 1. The development of the explosion, Eds. In: Anisimov AV, Ed. *The physics of a nuclear explosion. In 5 vol.* Moscow: Fizmatlit; 2009. 832 p. (in Russian).
18. Игнатьева ЛП, Потапова МО, Чирцова МВ и др. *Эколого-гигиенические критерии оценки загрязнения атмосферного воздуха*. Иркутск: ИГМУ; 2022. 79 с.
- Ignatieva LP, Potapova MO, Chirtsova MV, et al. *Ecological and hygienic criteria for assessing atmospheric air pollution*. Irkutsk: IGMU; 2022. 79 p. (in Russian).
19. Амосов ПВ, Бакланов АА, Макаров ДВ, Маслобоев ВА. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли. *Вестник МГТУ*. 2022;25(1):61–73.
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>
- Amosov PV, Baklanov AA, Makarov DV, Masloboev VA. 2022. Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size. *Vestnik of MSTU*. 2022;25(1):61–73 (in Russian).
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>
20. Добровольская Л.А., Ключев Д.С. Прогнозирование степени загрязнения атмосферного воздуха в промышленном регионе. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018;(36):216–23.
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142552>
- Dobrovolskaya LO, Kluev DS. Forecasting the degree of air pollution in the industrial region. *Bulletin of Priazovsky State Technical University. Ser. Techn Science*. 2018;(36):216–23 (in Russian).
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142552>
21. Шалыгина ИЮ, Кузнецова ИН, Нахаев МИ, Коновалов ИБ, Захарова ПИ. Прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха с применением данных численной модели атмосферы и химической транспортной модели. *Труды Гидрометцентра России*. 2017;365:81–93.
- Shalygina IYu, Kuznetsova IN, Nakhaev MI, Konovalov IB, Zaharova PV. Forecasting of weather conditions and air pollution with application of data of the numerical model of the atmosphere and a chemical transport model. *Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*. 2017;365:81–93 (in Russian).
22. Айдосов А, Айдосов ГА, Заурбеков НС. *Модельная оценка экологической обстановки компонентов природной среды с учетом атмосферных процессов*. М.: Академия Естествознания; 2018. 342 с.
- Aidosov A, Aidosov GA, Zaurbekov NS. *Model assessment of the ecological situation of the components of the natural environment taking into account atmospheric processes*. Moscow: Akademia Estestvoznania; 2018. 342 c. (in Russian).
23. Семакин АН. Оценка масштабируемости программы расчета движения примесей в атмосфере средствами симулятора gem5. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020;12(4):773–94.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-773-794>
- Semakin AN. Evaluation of the scalability property of the program for the simulation of atmospheric chemical transport by means of the simulator gem5. *Computer Research and Modeling*. 2020;12(4):773–94 (in Russian).
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-773-794>
24. Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis C, Dudhia J, Gill DO, et al. The Weather Research and Forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017;98(8):1717–37.
25. Sportisse B. *Fundamentals in air pollution: from processes to modelling*. Springer; 2010. 299 p.
26. Thakur P, Ballard S, Nelson R. Radioactive fallout in the United States due to the Fukushima nuclear plant accident. *Journal of Environmental Monitoring*. 2012;14(5):1317–24.
27. Sandberg A, Nikoleris N, Carison TE, Hagersten E. *Kaxiras detailed architectural simulation at near-native speed workload characterization*. 2015. P. 183–92.
28. Розинкина ИА, Ривин ГС, Багров АН, Блинов ДВ, Быков ФЛ, Васькова ДВ и др. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β - и γ -мезомасштабных атмосферных процессов. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023;(2):6–34.

- Rozinkina IA, Rivin GS, Bagrov AN, Blinov DV, Bykov FL, Vaskova DV, et al. The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2023;(2):6–34 (in Russian).
29. Старченко АВ, Беликов ДА, Вражнов ДА, Есаулов АО. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов. *Оптика атмосферы и океана*. 2005;18(5-6):455–61.
- Starchenko A.V., Belikov D.A., Vrazhnov D.A., Yesaulov A.O. Application of MM5 and WRF mesoscale models to research of regional atmospheric processes. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2005;18(5-6):455–61 (in Russian).
30. Danabasoglu G, Lamarque J-F, Bacmeister J, Bailey D, Duvivier A, Edwards J, et al. The Community Earth System Model version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020;12(2). <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
31. Кантюков РА, Мешалкин ВП, Панарин ВМ, Горюноква АА, Гимранов РК, Рыженков ИВ, Кантюков РР. Компьютерное моделирование загрязнения атмосферы при разрыве газопроводов. *Нефтегазовое дело*. 2015;13(1):90–6. EDN: VEDWKJ.
- Kantyukov RA, Meshalkin VP, Panarin VM, Goryunkova AA, Gimranov RK Rizhenkov IV, Kantyukov RR. Computer simulation of pollution in atmosphere ruptured pipeline. *Petroleum engineering*. 2015;13(1):90–6. EDN: VEDWKJ (in Russian).
32. Лаптева НА, Сафатов АС, Агафонов АП. Моделирование распространения аэрозольных частиц, содержащих вирус SARS-COV-2, вокруг госпиталя. *Оптика атмосферы и океана*. 2023;36(6):443–7. <https://doi.org/10.15372/AOO20230603>
- Lapteva NA, Safatov AS, Agafonov AP. Simulation of the sars-cov-2 virus containing aerosol particles spread around a hospital. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023;36(6):443–7 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/AOO20230603>
33. Уорк К, Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Пер. с англ. Под ред. Е.Н. Тевверовского. М.: Мир; 1980. 544 с.
- Wark K, Warner S. *Air pollution. Sources and controls*. Moscow: Mir; 1980. 544 p. (in Russian).
34. Яблоков АВ. О концепции «популяционного груза» (Обзор). *Гигиена и санитария*. 2015;(6):11–5. EDN: UXZQRD.
- Yablokov AV. On the concept of "population load" (Review). *Hygiene and Sanitation*. 2015;(6):11–5. EDN: UXZQRD (in Russian).
35. Макоско АА, Матешева АВ. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук; 2020. 258 с.
- Makosko AA, Matesheva AV. *Atmospheric pollution and the quality of life of the population in the 21 century: threats and prospects*. Moscow: RAS; 2020. 258 p. (in Russian).
36. Бородулин АИ, Десятков БМ, Ярыгин АА. Модель распространения атмосферных примесей в пограничном слое атмосферы. Программа для ЭВМ. 2006. Зарегистрирована Федеральным Институтом промышленной собственности РОСПАТЕНТа. Рег. номер 2007610293. 16.01.2007.
- Borodulin AI, Desyatov BM, Yarygin AA. *A model for the propagation of atmospheric impurities in the boundary layer of the atmosphere*. A computer program. Reg. No 2007610293. 16.01.2007 (in Russian).
37. Старченко АВ, Кижнер ЛИ, Данилкин ЕА и др. Численное моделирование погоды и качества атмосферного воздуха в городах. Томск: Изд-во Том. ун-та; 2022. 138 с.
- Starchenko AV, Kizhner LI, Danilkin EA, et al. *Numerical modeling of weather and atmospheric air quality in cities*. Tomsk: Tomsk University Press; 2022. 138 p. (in Russian).
38. Толстых МА. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, 2017. 166 с.
- Tolstykh MA. *Atmospheric modeling system for seamless forecasting*. Moscow: Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. 2017. 166 p. (in Russian).
39. Арутюнян РВ, Большов ЛА, Боровой АА, Велихов ЕП. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.; 2018. 408 с.
- Arutyunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. *System analysis of the causes and consequences of the accident at the "Fukushima-1" nuclear power plant*. Moscow; 2018. 408 p. (in Russian).
40. Бабков ВС, Ткаченко ТЮ. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2011;(13):147–55.
- Babkov VS, Tkachenko TYu. Analysis of mathematical models of distribution of impurities from point sources. *Scientific works of DonNTU. Series "Computer Science, cybernetics and computer engineering"*. 2011;(13):147–55 (in Russian).
41. Дунский ВФ, Никитин НВ, Соколов МС. Пестицидные аэрозоли. М.: Наука; 1982. 288 с.
- Dunsky VF, Nikitin NV, Sokolov MS. *Pesticide aerosols*. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (in Russian).

42. Бородулин АИ, Майстренко ГМ, Чалдин БМ. *Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета; 1992. 124 с.
Borodulin A.I., Maistrenko G.M., Chaldin B.M. *Statistical description of aerosol propagation in the atmosphere. Method and applications*. Novosibirsk: Novosibirsk University Press; 1992. 124 p. (in Russian).
43. Бородулин АИ, Десятков БМ. *Моделирование распространения примесей в атмосферном пограничном слое*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета; 2007. 376 с.
Borodulin A.I., Tens B.M. *Modeling of the propagation of impurities in the atmospheric boundary layer*. Novosibirsk: Novosibirsk University Press; 2007. 376 p. (in Russian).
44. Хрипков ЮИ. *Математическое моделирование в эпидемиологии при аэрозольном механизме передачи инфекции (количественная эпидемиология)*. М.: ВУ РХБЗ; 2003. 274 с.
Khripkov YuI. *Mathematical modeling in epidemiology with the aerosol mechanism of infection transmission (quantitative epidemiology)*. Moscow: VU RChBZ; 2003. 274 p. (in Russian).
45. Семенчин ЕА, Кузякина МВ. *Стохастические методы решения обратных задач в математической модели атмосферной диффузии*. М.: Физматлит; 2012. 176 с.
Semenchin EA, Kuzyakina MV. *Stochastic methods for solving inverse problems in a mathematical model of atmospheric diffusion*. Moscow: Fizmatlit; 2012. 176 p. (in Russian).
46. Csanady GT. Dispersion of particles from elevated sources. Part. I. *Aust J Phus*. 1955(8):545–50.
47. Csanady GT. Dispersion of dust particles from elevated sources. Part. II. *Aust J Phus*. 1957;(10):558–64.
48. Csanady GT. Variance of local concentration fluctuations. *Phys Fluids*. 1967;10(9):76–78.
49. Csanady GT. Turbulent diffusion: elementary statistical theory and atmospheric applications. *Turbulent Diffusion in the Environment. Geophysics and Astrophysics Monographs*, v. 3. Boston (USA): Reidol Publishing Company; 1973. P. 46–81.

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMIE. Наибольший вклад распределен следующим образом: А.М. Флеер – формирование концепции статьи, сбор, анализ и систематизация информации; А.С. Сипаков – критический пересмотр и коррекция рукописи; Ю.И. Хрипков – написание текста; критический пересмотр и коррекция рукописи, доработка рукописи, разработка иллюстративного материала All the authors confirm that they meet the ICMJE criteria for authorship. The most significant contributions were as follows. A.M. Fleer – elaboration of the concept of the paper; collection, analysis and systematization of scientific literature; A.S. Sipakov – critical discussion of the article; Yu.I. Khripkov – writing and editing of the article, critical discussion of the article, preparation of drawings.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Хрипков Юрий Иванович. Ведущий научный сотрудник отдела, д-р тех. наук, доцент.

Флеер Александр Михайлович. Начальник отдела.

Сипаков Александр Сергеевич. Зам. начальника отдела, канд. тех. наук, доцент.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l2@mil.ru

Контактное лицо: Хрипков Юрий Иванович; ; 27nc_l2@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Yurii I. Khripkov. Senior researcher. Dr Sci. (Techn.).

Aleksandr M. Fleer. Head of the Department.

Aleksandr S. Sipakov. Deputy head of the department. Cand. Sci. (Techn.).

Contact information for all authors: 27nc_l2@mil.ru

Contact person: Yurii I. Khripkov; 27nc_l2@mil.ru



Опыт применения частей и подразделений фугасных огнеметов в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 годов

В.В. Попов✉, А.М. Смирнов, В.В. Солнцев, В.А. Лагашкин, С.В. Колосович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27 nc_1@mail.ru

Основные моменты

Огнеметно-зажигательное вооружение Красной армии сохраняло свою значимость на протяжении Великой Отечественной войны (ВОВ).

Боевой опыт подтвердил эффективность фугасных огнеметов (ФОГ) в оборонительных и наступательных операциях.

К 1943 г. сформировались ключевые принципы их применения: массированное использование на главных направлениях, взаимодействие с другими родами войск и эшелонирование по глубине боевых порядков.

Актуальность. Изучение опыта применения ФОГ в годы ВОВ остается недостаточно освещенным, несмотря на его практическую ценность для современных боевых действий. Мощное поражающее и психологическое воздействие огнеметов делает их актуальными в условиях специальной военной операции.

Цель работы – обобщить опыт использования подразделений ФОГ в ВОВ и проследить эволюцию их тактики.

Источниковая база исследования. Архивные материалы ЦАМО РФ, открытые источники и электронные ресурсы.

Метод исследования. Применялся комплексный подход, включающий анализ военно-исторической литературы и архивных данных.

Результаты. Огнеметные подразделения внесли значительный вклад в победу, особенно после 1943 года, когда их применение стало частью армейских и фронтовых операций. Совершенствование тактики повысило живучесть и эффективность ФОГ.

Заключение. Опыт ВОВ подтвердил важность ФОГ в ближнем бою. Их изучение необходимо для подготовки специалистов РХБ защиты, а принципы применения могут быть адаптированы к условиям специальной военной операции.

Ключевые слова: боевые действия; Великая Отечественная война; Красная армия; огнеметно-зажигательные средства; отдельная рота фугасных огнеметов; специальная военная операция; фугасный огнемет; иттурмовой отряд

Для цитирования: Попов В.В., Смирнов А.М., Солнцев В.В., Лагашкин В.А., Колосович С.В. Опыт применения частей и подразделений фугасных огнеметов в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 годов. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):279–300. EDN:wnmntm.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-279-300>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 08.11.2024 г. Исправленный вариант 02.04.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

The experience of employing units and subunits of explosive flamethrowers during the Great Patriotic War of 1941–1945

Valery V. Popov✉, Aleksandr M. Smirnov, Viktor V. Solntsev, Valery A. Lagashkin, Svetlana V. Kolosovich

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence
of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

IFlamethrower-incendiary weapons of the Red Army maintained their significance throughout the Great Patriotic War (GPW).

Combat experience confirmed the effectiveness of explosive flamethrowers (FOGs) in both defensive and offensive operations.

By 1943, key principles of their employment had been established: massed use on main axes of advance, combined arms coordination, and echeloned deployment in depth.

Relevance. The study of FOG employment during the GPW remains under-researched, despite its practical value for modern warfare. The devastating lethal and psychological effects of flamethrowers make them relevant in the context of the Special Military Operation (SMO).

The purpose of the study is to summarize the combat experience of FOG units during the GPW and trace the evolution of their tactical use.

Study base sources. Archival materials from the Central Archives of the Russian Ministry of Defence (TsAMO RF), open-source publications, and electronic resources.

Research methods. A comprehensive approach, including analysis of military-historical literature and archival records.

Results. Flamethrower units made a significant contribution to victory, particularly after 1943, when their employment became integral to army- and front-level operations. Tactical improvements enhanced their survivability and combat effectiveness.

Conclusion. The GPW experience confirmed the critical role of FOGs in close combat. Their study is essential for training CBRN defense specialists, and their employment principles can be adapted to the SMO.

Keywords: assault detachment; combat operations; explosive flamethrower; Great Patriotic War; incendiary-flamethrower weapons; Red Army; separate company of explosive flamethrowers; Special Military Operation

For citation: Popov V.V., Smirnov A.M., Solntsev V.V., Lagashkin V.A., Kolosovich S.V. The experience of employing units and subunits of explosive flamethrowers during the Great Patriotic War of 1941–1945. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):279–300. EDN:wnmntm.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-279-300>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF).

Received November 8, 2024. Revised April 2, 2025. Accepted September 27, 2025.

В русской армии фугасные огнеметы (ФОГи) появились в последние годы Первой Мировой войны (ПМВ). Накануне Великой Отечественной войны (ВОВ) в Красной армии на вооружении состояли ранцевые огнеметы, фугасные огнеметы и огнеметные танки. С началом ВОВ сухопутные войска стали активно применять бутылки с горючей смесью, а авиация – зажигательные бомбы и средства. В различных условиях ведения боевых действий в частях менялась тактика применения огнеметно-зажигательных средств (ОЗС), приобретался боевой опыт, который может пригодиться в настоящее время [1].

Цель работы – обобщить опыт использования подразделений ФОГ в ВОВ и проследить эволюцию их тактики.

Источниковая база исследования. Проанализированы архивные материалы ЦАМО РФ, открытые источники и электронные ресурсы.

Метод исследования. Применялся комплексный подход, включающий анализ военно-исторической литературы и архивных данных.

Для достижения цели исследования эволюция и тактика применения ФОГов рассматривалась по периодам войны и решаемым боевым задачам.

1. Применение подразделений фугасных огнеметов в первом периоде Великой Отечественной войны

В апреле 1941 г. конструкторами С.И. Новиковым, Б.В. Кузнецовым, Е.А. Серегиним, С.М. Долиным в Государственном союзном конструкторском бюро № 47 (ГсКБ-47) был сконструирован и постановлением Государственного Комитета Обороны от 12 июля 1941 г. принят на вооружение фугасный огнемет ФОГ-1 [2]. Он предназначался для борьбы с пехотой и танками противника. ФОГ-1 – оружие однократного действия, представляющее собой цилиндр с направляющим стволом (брандспойтом), через который под давлением пороховых газов выбрасывалась горючая смесь¹. Зажигательное устройство монтировалось на стволе брандспойта. На позиции огнемет устанавливался в специальном окопе и тщательно закреплялся [3]. Пороховой (металлический) заряд и зажигательная шашка, воспламеняющая струю, были разделены и имели свои отдельные электрозапалы [2]. К концу 1941 года промышленностью СССР было изготовлено и отправлено в действующую армию 25695 фугасных огнеметов. Тактико-технические характеристики фугасного огнемета ФОГ-1 представлены в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Тактико-технические характеристики фугасного огнемета ФОГ-1
Table 1. Tactical and Technical Characteristics of the FOG-1 Explosive Flamethrower

Параметры / Parameter	Огнемет ФОГ-1 / Flamethrowers FOG-1
Тип огнемета / Type	Пороховой, беспоршневой, однократного действия / Powder-actuated, pistonless, single-action
Масса неснаряженного огнемета, кг / Weight of unloaded flamethrower, kg	33–35
Масса снаряженного огнемета, кг / Weight of equipped flamethrower, kg	52–55
Рабочая вместимость резервуара, л / Working capacity of the tank, l	25
Рабочее давление, атм / Working pressure, atmospheres	40–50
Диаметр сопла брандспойта, мм / Nozzle diameter of the fire hose, mm	30
Диаметр радиального сопла, мм / Radial nozzle diameter, mm	12
Дальность огнеметания с пятаисопловой головкой, м: / Flame throwing range with five-nozzle head, m:	
- жидкой огнесмесью / - liquid fire mixture	90–100
- вязкой огнесмесью / - viscous fire mixture	45–50

¹ Смирнов АМ, Соляник НП, Шило НИ. Научно-историческая конференция «100 лет – войскам радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации». Вестник войск РХБ защиты. 2018;2(4):85. EDN: VMUPLG.

Продолжение таблицы 1

Параметры / Parameter	Огнемет ФОГ-1 / Flamethrowers FOG-1
Дальность струеметания при угле 5–7°, м: / Jet throwing range at an angle of 5-7°, m: - вязкой огнесмесью / - viscous fire mixture - жидкой огнесмесью / - liquid fire mixture	130–140 50–60
Дальность струеметания из 5 сопловой головки (диаметр поражаемой площади), м: Jet range from 5 nozzle head (diameter of affected area), m: - вязкой огнесмесью / - viscous fire mixture - жидкой огнесмесью / - liquid fire mixture	90–100 45–50
Количество огнеметных выстрелов с одной зарядки / Number of flamethrower shots per charge	1
Источник давления / Pressure source	Пороховые газы
Примечание. Таблица адаптирована авторами из: Временное руководство по подготовке фугасных огнеметчиков. Управление Военно-химической защиты Красной Армии. М.: Военное Издательство Комиссариата Обороны Союза ССР; 1941. С. 3–5. Note. The table was adapted by the authors from: "Vremennoe rukovodstvo po podgotovke fugasnyh ognemetchikov. Upravlenie Voenno-himicheskoy zashhity Krasnoj Armii." Moscow: Voennoe Izdatel'stvo Komissariata Oborony Sojuza SSR; 1941. P. 3–5.	

Несмотря на ряд технических несовершенств и тактическую сложность при боевом применении, использование фугасных огнеметов было достаточно результативно. Поэтому немецкие конструкторы в ходе войны скопировали советский фугасный огнемет.

В оперативно-разведывательной сводке по химической службе Воронежского фронта за январь 1943 г. сообщалось, что в районе Петровское были захвачены на позициях 153 снаряженных фугасных огнемета немецкого производства типа наших советских ФОГ-1 [5].

Первый период ВОВ характеризовался для Красной армии тяжелыми оборонительными боями. Одной из основных задач на поле боя, стоявшей перед Красной армией, было уничтожение танков и пехоты противника.

Для выполнения этой задачи, при недостаточном количестве штатных противотанковых средств, стали применяться сформированные в августе 1941 г. 50 отдельных рот фугасных огнеметов (штат № 011/10 от 23 июля 1941 г.).

В оборонительных боях I периода ВОВ отдельные роты фугасных огнеметов (орфо) придавались стрелковым дивизиям и реже стрелковым полкам, оборонявшим танкоопасные направления.

Первый боевой опыт показал их эффективность в обороне. Помимо огневого воздействия на противника применение фугасных огнеметов оказывало сильный моральный и психологический эффект.

16 октября 1941 г. 27-я отдельная рота фугасных огнеметов 3Ф (Западный фронт) (командир роты л-т Н. Сизарев²) и 28 орфо во взаимодействии со стрелковыми и саперными подразделениями у д. Рылово своими действиями сорвали атаку 47 немецких танков, вынудив гитлеровцев изменить направление удара и перенести атаку [6].

В ноябре 1941 г. в Главном военно-химическом управлении Красной армии (ГВХУ КА) проанализировали опыт боевого применения огнеметных рот, и в числе прочих был сделан вывод, что огнеметы «...при умелом использовании их во взаимодействии с пехотой и ее огневыми средствами являются се-

² Сизарев Николай Иванович – майор, родился 12 декабря 1919 г. В годы Великой Отечественной войны командовал 27-й отдельной фугасно-огнеметной ротой, 206-й отдельной ротой ранцевых огнеметов, 30-м отдельным ордена Красной Звезды батальоном ранцевых огнеметов. Погиб 8 апреля 1945 г. при освобождении Вены.

резным средством для уничтожения живой силы противника, отрыва ее от танков и для борьбы с самими танками»³. Осенью 1941 года основным огнеметным подразделением была отдельная рота фугасных огнеметов.

При однократном применении огнеметная рота была способна поразить противника 4,5 тыс. литрами огнесмеси. Централизованное применение огнеметной роты при построении боевого порядка роты в два эшелона обеспечивало поражение противника на фронте до 1,5 км, а в отдельных случаях – до 2,5–3 км [7].

Широко известен эпизод битвы за Москву, когда воины 26-й отдельной роты фугасных огнеметов сорвали попытку германских войск прорвать оборону 32-й стрелковой дивизии полковника В.И. Полосухина в районе деревни Акулово. В начале декабря 1941 г. 26-я орфо под командованием лейтенанта Михаила Степановича Собоцкого занимала огневые позиции в боевых порядках стрелковых подразделений 32-й сд (5 армия, Западный фронт). Рота действовала повзводно, имея задачу – во взаимодействии со стрелковыми подразделениями и артиллерией не допустить продвижение танков и пехоты противника к Кубинке⁴.

Подрыв замаскированных под стога сена, кусты и другие предметы огнеметов произвел на наступающих немцев сильный деморализующий эффект. Успешное применение фугасных огнеметов ФОГ-1 26-й орфо привело к уничтожению до ста вражеских автоматчиков и четырех танков.

Действия огнеметчиков 26-й орфо были отмечены в приказе командующего войсками ЗФ: «...В районе Дютково и Акулово

с большим боевым эффектом были использованы фугасные огнеметы, которыми уничтожено четыре танка и до роты автоматчиков...»⁵.

Опыт успешных боевых действий 26-й орфо и других подразделений фугасных огнеметов был обобщен и направлен ГВХУ КА во все химические части в виде соответствующих указаний⁶.

При заблаговременной организации обороны, вне соприкосновения с противником, отдельные роты фугасных огнеметов располагали в полосе обеспечения и на рубеже боевого охранения. Огнеметы устанавливались мелкими группами (2–3 огнемета) или поодиночке.

На позиции огнемет устанавливался в специальном окопе, тщательно закреплялся и приводился в действие электрическим током низкого напряжения.

В обороне при непосредственном соприкосновении с противником части фугасных огнеметов в начале войны использовались на переднем крае главной полосы обороны во взаимодействии с огнем стрелковых подразделений и инженерными заграждениями.

В последующих оборонительных боях вместо мелких огнеметных групп и одиночных огнеметов на позициях устанавливались огнеметные «кусты»⁷. Однако и этот боевой порядок частей фугасных огнеметов не полностью отвечал условиям их использования.

Централизованное боевое использование огнеметных рот напротив обеспечивало массирование и достаточно широкий фронт огневого прикрытия. Они располагались на огневых позициях в один-два эшелона⁸.

³ Солнцев В. Поставить на пути врага огневой заслон. *Красная Звезда*. 2021;1:10.

⁴ Шило НИ. Памяти героев огнеметчиков – защитников Москвы (Митинг-реквием в деревне Акулово). *Вестник войск РХБ защиты*. 2019;3(3):294. EDN: UFUMNO.

⁵ Шило НИ. Огнеметчики и огнеметы. Историческое исследование. Рецензия на книгу Солнцева ВВ. Огнеметчики и огнеметы. *Вестник войск РХБ защиты*. 2023;7(4):395. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-4-393-396>

⁶ Военная безопасность России: взгляд в будущее: Материалы 6-й Международной межведомственной научно-практической конференции научного отделения № 10 Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Москва, 18 марта 2021 г.: в трех томах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2021. Т. 3:148–9.

⁷ Огнеметный «куст» представлял собой обычный стрелковый окоп полного профиля с ходом сообщения, выходящим в траншею, занимавшуюся стрелковыми подразделениями. Перед окопом на расстоянии 1–4 м устанавливалось 5–10 огнеметов. Огнеметчики располагались в окопе. Огнеметные «кусты» оборудовались для круговой обороны и располагались на удалении 100–200 м один от другого, исходя из возможной максимальной дальности огнеметания. Каждый огнеметный «куст» мог вводиться в действие самостоятельно, или же вводилось в действие несколько «кустов» одновременно. В «кусте» могло подрываться одновременно по два огнемета. Огнеметные «кусты» не обеспечивали отражения многократных атак противника на огнеметную позицию. Они были весьма чувствительны к огню артиллерии и минометов противника и при обстреле быстро выходили из строя. Кроме того, усложнялась организация взаимодействия со стрелковыми подразделениями.

⁸ При одноэшелонном расположении боевой порядок строился «в линию», «углом назад (вперед)», «уступом» за одним из флангов.

Дальнейший опыт оборонительных боев ВОВ показал, что использование частей фугасных огнеметов на переднем крае главной полосы обороны не всегда целесообразно. Общевоинские командиры использовали приданные им огнеметные части на всем фронте оборонительной полосы (участка), стремясь везде иметь огнеметные заграждения. Огнеметы располагались на позиции в линию, иногда без огневого взаимодействия между собой и без огневого прикрытия. Линейное расположение огнеметов на широком фронте исключало их массированное применение и эшелонирование в глубину⁹.

Использование частей фугасных огнеметов на переднем крае затруднялось еще и потому, что эти части не могли вести длительного боя при помощи своего основного оружия – огнеметов. Лучший результат огнеметания достигался тогда, когда части фугасных огнеметов, взаимодействуя с другими родами войск, использовались в глубине обороны при эшелонированном расположении огнеметных позиций. Для повышения скорости доставки огнеметов к местам установки или к местам подрыва использовались подручные средства, в том числе изготовленные самими красноармейцами. Эшелонированное расположение огнеметных позиций в глубину заставляло наступающего противника изменять направление атаки, расстраивало его боевой порядок, затрудняло управление и содействовало уничтожению врага по частям (рисунки 1).

В начале ноября 1941 г. Главное военное химическое управление в своей Директиве от 9 ноября 1941 г. № 003 потребовало от войск:

- в обороне ФОГ использовать в глубине боевых порядков пехоты на танкоопасных направлениях с блокировкой всех дорог и скрытых подступов;
- огнеметные позиции эшелонировать в глубину и оборудовать для круговой обороны;
- организовать тесное взаимодействие частей фугасных огнеметов с другими родами войск;
- огнеметные позиции прикрывать огнем пехоты и артиллерии.

Успешные действия отдельных рот фугасных огнеметов в значительной степени определили дальнейшее наращивание количества огнеметных подразделений. С марта 1942 г.



Рисунок 1 – Фугасные огнеметы ФОГ-1 на самодельных салазках. Закреплены и подключены (фотография – зима 1941–1942 гг. ЦАМО. Ф. 74. Оп. 12308. Д. 111. Л. 24)

Figure 1: FOG-1 explosive flamethrowers on improvised sled mounts, deployed & connected (Winter 1941–1942, TsAMO Archives. Fond 74, Opis 12308, File 111, Sheet 24)

по указаниям ставки ВГК дополнительно было сформировано еще 50 рот фугасных огнеметов. По состоянию на 11 июля 1942 г. в Красной армии числилось 92 огнеметные роты (из которых участвовали в боевых действиях в составе фронтов – 72, подготовлены к отправке в действующую армию – 20), а на 27 июля – 98 рот. Причем значительная часть огнеметных рот действовала в составе ЗФ (Западный Фронт) и БрФ (Брянский Фронт) – 34 роты (47 %). Кроме рот фугасных огнеметов армий и фронтов, в январе 1942 г. были сформированы огнеметные роты УРов (укрепленных районов) [8].

Боевые действия отдельных рот фугасных огнеметов при обороне городов. В конце первой декады октября 1942 г. 100-я и 104-я отдельные роты фугасных огнеметов, находившиеся в резерве командующего 62-й армией, были приданы 37-й гвардейской стрелковой дивизии и переправлены в Сталинград.

К исходу дня 13 октября 100-я отдельная рота фугасных огнеметов (командир роты лейтенант В.Н. Волков) заняла оборону между Верхним поселком Сталинградского тракторного завода (СТЗ) и Горным поселком (сев.-зап. завода «Красный Октябрь»), а также перекрыла несколько дорог, идущих к городу. 104-я отдельная рота фугасных

⁹ Наступающий противник легко преодолевал такие огнеметные заграждения. 16 октября 1941 г. на Можайском направлении командир 17-го стрелкового полка расположил приданную ему 40-ю отдельную огнеметную роту по всему переднему краю своего оборонительного участка в одну линию, и противник, обнаружив эти заграждения, легко их преодолел.

огнеметов (командир роты младший лейтенант Гаврилин) с 11 октября занимала оборону в районе Житомирский овраг (рисунок 2).

14 октября гитлеровцы несколькими танковыми группами атаковали подразделения 118-го и 114-го стрелковых полков. Несколько танков начали обход построек СТЗ справа и вышли на позиции 1-го огнеметного взвода 100-й отдельной роты фугасных огнеметов. При подходе танков противника на 35–40 м было произведено огнеметание и подожжен один танк. Другая группа танков вышла на позиции 2-го огнеметного взвода, который огнеметанием уничтожил 2 танка и группу пехоты противника. В ходе тяжелого боя наши стрелковые подразделения и огнеметчики понесли значительные потери и отошли к сборочному цеху. На следующий день огнеметчики продолжали бой стрелковым вооружением, так как огнеметы были выведены из строя. В ходе боя 14 октября только огнеметанием 100-й отдельной роты фугасных огнеметов было сожжено 3 танка и до 50 гитлеровцев.

104-я отдельная рота фугасных огнеметов огнеметания не производила и вела бой

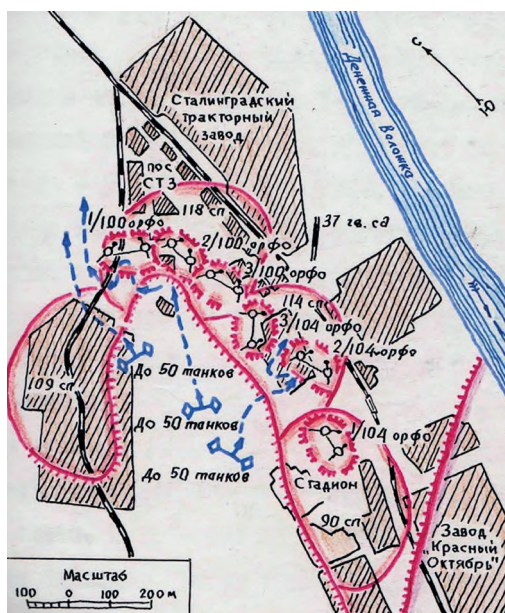


Рисунок 2 – Боевые действия 100-й и 104-й отдельных рот фугасных огнеметов в оборонительных боях за Сталинград в октябре 1942 г. [1, С. 35] (Исторический архив 27 НЦ МО РФ)

Figure 2: Combat Operations of the 100th and 104th Separate Explosive Flamethrower Companies in the Defence of Stalingrad, October 1942 (Source: [1, P. 35], Historical Archives of the 27 SC MD RF)

стрелковым оружием, так как противник не подходил к огнеметным позициям¹⁰.

В период обороны в Сталинграде и на подступах к городу в боях принимали участие до 19 отдельных рот фугасных огнеметов. Огнеметчики неоднократно отбивали атаки танков и пехоты противника, содействуя нашим стрелковым подразделениям в удержании позиций. Успешные действия огнеметчиков были высоко оценены командованием 62-й армии.

Действия огнеметных рот во многом способствовали продвижению стрелковых частей вглубь обороны противника, сковывая его действия и уничтожая бронетехнику, огневые точки и личный состав.

Накопленный в ходе первого периода войны опыт позволил выработать принципы использования частей ФОГ в оборонительном бою. Они стали использоваться в глубине обороны общевойсковых соединений для прикрытия основных танкоопасных направлений, для удержания важных обороняемых объектов (крупных населенных пунктов, узлов дорог и др.). Использование частей ФОГ в глубине обороны позволяло сохранять внезапность огнеметания и во взаимодействии с артиллерией и минометами, танковыми и общевойсковыми резервами уничтожать прорывающегося противника [9].

На основании исследований и в соответствии с опытом ведения боевых действий было выработано наиболее целесообразное построение боевых порядков, эшелонированных в глубину и дающих сплошную полосу огня на фронте 1000–1200 м (линия, углом вперед, углом назад, уступом и в два эшелона).

В последующем боевой порядок огнеметной части строился в зависимости от обстановки, характера местности, вероятного направления атак противника. Основным принципом был избран принцип централизованного применения отдельных рот ФОГ.

Опыт боевого применения подразделений фугасных огнеметов показал целесообразность их массированного применения на широком фронте.

Основными тактическими принципами боевого использования огнеметных частей в этот период были:

- массированное применение на главном направлении фронта и армии;
- тесное взаимодействие с родами войск и другими подразделениями огнеметно-зажигательных средств;

¹⁰ ЦАМО. Ф. 48. Оп. 484. Д. 5. Л. 124, 138, 142.

- эшелонирование подразделений огнеметно-зажигательных средств по глубине боевого построения частей и соединений.

Опыт применения подразделений фугасных огнеметов в обороне в I периоде ВОВ показал, что они могли выполнять весьма разнообразные боевые задачи:

- поражение живой силы и боевой техники противника при атаке переднего края нашей обороны и при прорыве его в глубину обороны;

- прикрытие стыков и флангов обороняющихся частей, соединений и объединений (группировок);

- прикрытие танкоопасных направлений в глубине нашей обороны;

- прикрытие огневых позиций артиллерийских групп;

- усиление частей на армейских отсечных позициях;

- действие в составе артиллерийско-противотанкового или подвижного резерва фронта (армии) и т.д.

Каждая из этих задач в зависимости от времени года, характера местности, условий ведения обороны и других факторов имела свои особенности.

Стрелковые соединения в свою очередь использовали в полной мере силу огня и моральный эффект огнеметов, что обеспечивало устойчивость и живучесть обороны, а также успешное проведение контратак. Применение частей фугасных огнеметов в обороне повышало ее устойчивость, содействовало своим войскам возможностью дробить на части боевые порядки наступающего противника и уничтожать его по частям [9].

Успешно применялись роты, батальоны ФОГ и в наступательных действиях. Основными задачами, решаемыми огнеметными подразделениями в наступлении были: удержание рубежей, объектов и районов; уничтожение наступающих сил противника; подавление окруженных формирований; подавление противника в зданиях и фортификационных сооружениях.

В условиях, когда линия непосредственного боевого соприкосновения советских и немецко-фашистских войск была меньше ста метров, задачи по огневой поддержке наступления возлагались на подразделения фугасных огнеметов. Так, в середине 1943 г. войска 339-й стрелковой дивизии вышли к реке Керчь и готовились к штурму. Расстояние между траншеями противника и окопами наших войск было 70–80 м. Дивизионное командование приняло решение перед про-

ведением атаки совместно с артиллерийской подготовкой использовать огнеметные средства ооб. На участке фронта протяженностью около одного километра батальон установил до четырехсот ФОГ-1. Утром 18 ноября 1943 г., по завершении орудийного обстрела вражеских позиций, был сделан залп по траншеям немцев из подготовленных огнеметов. Такого развития событий противник не ожидал. Последующая атака наших войск позволила одним броском преодолеть три траншеи, захватить несколько укрепленных объектов и овладеть значительным по площади районом. В этом бою потеря бойцов Красной армии не было [10].

В первом периоде ВОВ орфо с честью выполнили все поставленные перед ними задачи. В Московской зоне обороны содействие стрелковым подразделениям и прикрытие танкоопасных направлений сорвали план Гитлера молниеносной войны с Советским Союзом, поставили последнюю точку в наступлении германской армии на Москву, после чего противник на всем московском участке фронта перешел к обороне [2].

Приобретая необходимый опыт в упорных боях за Москву и Сталинград, меняли тактику действий подразделения ФОГ. Постепенно переходя от линейной к глубокоэшелонированной тактике действий, орфо повышали эффективность огневого поражения противника, чем обеспечивали себе живучесть и устойчивость в оборонительных боях.

2. Опыт применения подразделений и частей фугасных огнеметов во втором и третьем периодах Великой Отечественной войны

К концу 1942 года в войсках Красной армии действовали десятки отдельных рот ФОГ. В этот период развивалась и совершенствовалась тактика применения ФОГ не только в оборонительных, но и в наступательных операциях.

Применение подразделений и частей фугасных огнеметов в наступательных операциях конца 1942 – первой половине 1943 г. В Сталинградской битве принимало участие большое количество огнеметных подразделений. Только в составе 62-й армии, ведущей бои непосредственно за город, в сентябре месяце действовало 6 рот фугасных огнеметов (23, 73, 102, 105, 106 и 107). Всего же в войсках Сталинградского и Юго-Восточного фронтов на подступах к Сталинграду действовало 18 рот фугасных огнеметов [11].

В период наступления под Сталинградом фугасно-огнеметные роты¹¹ были приданы стрелковым дивизиям и действовали децентрализованно, небольшими группами огнеметчиков в тесном взаимодействии со стрелковыми подразделениями для выжигания противника из многочисленных укрепленных строений, подвалов и долговременных огневых точек, для отражения контратак противника, а также для закрепления рубежей, захваченных нашими частями в ходе наступления.

В боях в городе Сталинграде фугасные огнеметы использовались для решения следующих задач:

- для закрепления рубежей, захваченных наступающими частями (рисунок 3)¹²;
- для отражения контратак противника;
- для выжигания противника из долговременных огневых точек и укрепленных домов¹³.

При контратаках противника внезапное применение фугасных огнеметов вызывало замешательство в его рядах, заставляя откатываться назад, зачастую с большими потерями. Успешные действия огнеметчиков были высоко оценены командованием 62-й армии. В одном из своих приказов командующий 62-й армией генерал-лейтенант В.И. Чуйков писал: «За время боев по уничтожению немецко-фашистских захватчиков в заводской части г. Сталинграда личный состав огнеметных рот проявил мужество и отвагу и с честью выполнил возложенные на него боевые задачи. За время боев огнеметными ротами уничтожено более 600 гитлеровцев, сожжен не один десяток ДЗОТ и опорных пунктов противника. Своими активными действиями роты умело обеспечивали успех

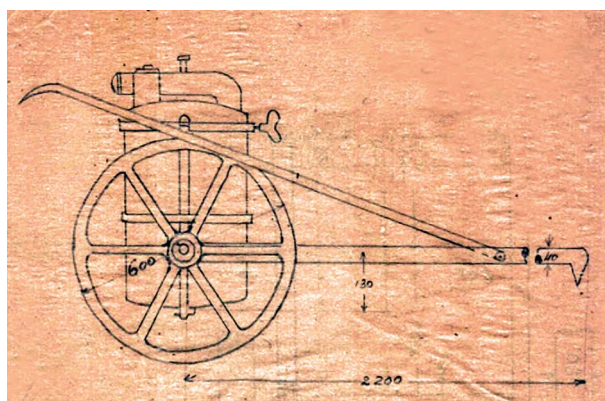


Рисунок 3 – Подвижная тележка для ФОГ-2. Альбом схем к работе гв. инженер-подполковника Левина: «Использование огнеметно-зажигательных средств в боях за города и крупные населенные пункты по опыту Отечественной войны» (ВАХЗ Советской Армии им. К.Е. Ворошилова, 1948 г. Сх. № 9. Исторический архив 27 НЦ МО РФ)

Figure 3: Mobile Cart for FOG-2 Flamethrower from the Schematic Album to the Work by Guards Engineer-Lieutenant Colonel Levin: "Ispol'zovanie ognemetno-zazhigatel'nyh sredstv v bojah za goroda i krupnye naselennye punkty po opyту Otechestvennoj vojny" (VAHZ Sovetskoj Armii im. K.E. Voroshilova, 1948. Sh. № 9. Historical Archives of the 27 SC MD RF)

пехоты, а в блокировке и уничтожении ДЗОТ нередко играли решающую роль»¹⁴.

Эффективность применения орфо была столь высока, что командующие фронтами и армиями сами создавали роты ФОГ. Решением Военного Совета 20-й армии Западного фронта за счет общего некомплекта армии были сформированы 3 отдельные фугасно-огнеметные роты по штату № 011/100¹⁵. Роты были полностью укомплектованы личным со-

¹¹ Во время ВОВ отдельные роты фугасных огнеметов именовались отдельными фугасно-огнеметными ротами (офор). В отдельных случаях встречаются наименования офогр – отдельная фугасно-огнеметная рота, орфог – отдельная рота фугасных огнеметов, ООР – отдельная огнеметная рота (ЦАМО. Ф. 74. Оп. 12308. Д. 196. Л. 36), отдельная рота ФОГ (Примечание авторов).

¹² Для выполнения задачи закрепления захваченных рубежей в каждой огнеметной роте был выделен подвижный резерв в составе 30–40 фугасных огнеметов, установленных на салазках. Это позволяло группе огнеметчиков при захвате того или иного рубежа быстро выдвигаться вперед и оперативно устанавливать фугасные огнеметы для огнеметания непосредственно с салазок. Если позволяло время, огнеметы снимались с салазок, устанавливались в лунки, закреплялись и маскировались.

¹³ Для выжигания противника из долговременных огневых точек и прочих укрытий, выделялись один-два фугасных огнемета. К огневой точке противника огнеметчики выдвигались скрытно, как правило, в ночное время и на расстоянии 60–70 м устанавливали фугасные огнеметы. Подрыв огнеметов служил сигналом для атаки штурмовой группы. В большинстве случаев действия огнеметчиков приводили к уничтожению огневой точки или к паническому бегству ее расчета.

Краткое описание использования огнеметно-зажигательных средств при оборонительных и наступательных действиях в г. Сталинграде. ЦАМО. Ф. 345. Оп. 5487. Д. 54. Лист начала документа в деле: 318. Авторы документа: 62 А, подполковник Дворцов, майор Непокрытых.

¹⁴ ЦАМО РФ. Ф. 8 гв. А. Оп. 5508. Д. 9. Л. 6.

¹⁵ ЦАМО. Ф. 74. Оп. 12308. Д. 278. Л. 12.

ставом и материальной частью и участвовали в боевых действиях. В дальнейшем на основании директивы Заместителя НКО СССР генерал-полковника ЩАДЕНКО от 21.3.1943 г. за № орг/5/3907 сформированным по штату № 011/100 за счет общего некомплекта армии 3 отдельным фугасно-огнеметным ротам были присвоены номера: в 8А – 153, в 4А – 154, в 59А – 203 и в последующем роты именовались: 153 отдельная огнеметная рота, 154 отдельная огнеметная рота, 203 отдельная огнеметная рота¹⁶.

Применение подразделений и частей фугасных огнеметов в оборонительных боях лета 1943 г. В оборонительных боях лета 1943 г. орфо использовались для прикрытия танкоопасных направлений, важных в тактическом отношении высот и других объектов, а также для обеспечения действий разведывательных групп. Успех действий подразделений огнеметчиков в обороне обуславливался встраиванием позиций фугасных огнеметов в систему огня противотанковой артиллерии, их эшелонированием в глубину обороны, а также тщательной маскировкой позиций. Внезапное, неожиданное применение огня фугасных огнеметов оказывало на противника мощное психологическое воздействие и зачастую заставляло его отказываться от активных действий на данном направлении.

С переходом войск Красной армии в наступление подразделения фугасных огнеметов придавались стрелковым дивизиям, действующим в первом эшелоне наступающих войск. Они входили в состав подвижного резерва командиров дивизий и продвигались непосредственно за боевыми порядками наступающих частей. Основными задачами подразделений ФОГ в этот период были обеспечение

открытых флангов и стыков между стрелковыми дивизиями, закрепление захваченных рубежей и важных населенных пунктов, отражение контратак противника.

В ходе боев приобретался опыт применения ФОГ, увеличивалось количество огнеметных частей, и вместе с этим существенно менялись взгляды на их применение. В период наступательных действий 1943 года были созданы сильные оперативные группы, состоящие из нескольких огнеметных частей. Такая группа огнеметных частей являлась подвижным резервом командующего армией или фронта и предназначалась для обеспечения флангов ударных группировок наступающих войск¹⁷.

Формирование отдельных батальонов фугасных огнеметов. Боевой опыт Сталинградского, Воронежского, Западного и других фронтов показал, что наибольший эффект применения фугасных огнеметов достигался при массированном и централизованном их использовании, когда на важнейших участках обороны располагалось несколько огнеметных рот вместе с органом управления. Это вызвало необходимость реорганизации орфо в огнеметные батальоны¹⁸.

К 10 мая 1943 г. в подмосковных Кузьминках были сформированы первые два огнеметных батальона: 1-й и 2-й отдельные моторизованные противотанковые огнеметные батальоны¹⁹.

Всего в мае 1943 г. были сформированы пять отдельных моторизованных противотанковых огнеметных батальонов (омптоб).

Осенью 1943 г. продолжилось формирование огнеметных батальонов. В течение сентября 1943 года было сформировано двадцать два отдельных батальона фугасных огнеметов²⁰.

¹⁶ ЦАМО. Ф. 74. Оп. 12308. Д. 278. Л. 21.

¹⁷ На Западном фронте в августе 1943 года 11 из имеющихся 15 рот фугасных огнеметов были приданы войскам, а четыре роты использовались в качестве подвижного резерва.

¹⁸ В 1943 году директивой заместителя Народного комиссара обороны Союза ССР № 744105 от 26 апреля Главному военно-химическому управлению Красной армии была определена задача по формированию пяти отдельных моторизованных батальонов фугасных огнеметов. Батальоны формировались по штату № 011/37 (ЦАМО Ф. 74. Оп. 12308. Д. 278. Л. 33), в соответствии с которым состояли из трех огнеметных рот и автороты. Каждая огнеметная рота состояла из трех огнеметных взводов по три огнеметных отделения. В отделении по штату состояло 24 фугасных огнемета. Таким образом, всего в батальоне предполагалось иметь 648 ФОГ.

¹⁹ Боевой путь 2 омптоб. ЦАМО. Ф. 87215. Оп. 034701с. Д. 0001. Лист начала документа в деле: 1. Авторы: 2 омптоб, майор Халиков, капитан Кошелев.

²⁰ Отдельные огнеметные батальоны (ооб) формировались трехротного состава по три взвода в огнеметной роте. Взводы состояли из четырех отделений по 18 фугасных огнеметов в каждом отделении. Всего во взводе было 72, в роте – 216, в батальоне – 648 фугасных огнеметов. Огнеметные батальоны были способны при огнеметании создать сплошную зону огня на фронте 3,0–3,5 км при глубине расположения боевого порядка от 400 до 800 м. Одновременно были внесены изменения в штат моторизованного огнеметного батальона. Количество фугасных огнеметов в его отделениях было сокращено с 24 до 20. Таким образом, в батальоне

Итого в течение 1943 г. были сформированы 27 отдельных батальонов фугасных огнеметов (обфо). Огнеметные батальоны являлись средством командующего фронтом и в зависимости от задач придавались на усиление армиям и стрелковым корпусам.

В декабре 1943 г. отдельные фугасно-огнеметные роты частично вошли в состав формируемых огнеметных батальонов, частично были расформированы. В некоторых армиях, к примеру, в 39-й армии сохранились отдельные армейские фугасно-огнеметные роты.

В 1943 г. развитие огнеметно-зажигательных средств шло по пути формирования отдельных воинских частей, вооруженных фугасными огнеметами, при этом вырабатывалась тактика их боевого применения в различных видах боя, а также приобретался опыт эксплуатации нового фугасного огнемета ФОГ-2 (рисунок 4).

В отличие от фугасного огнемета ФОГ-1, ФОГ-2 имел только укороченное сопло на-

правленного действия, мог перекачиваться по земле и имел, наряду с электрическим, механический способ подрыва [12].

Фугасные огнеметы ФОГ-2 устанавливались на огневой позиции стационарно в грунт и без перезарядки могли производить только один выстрел, выбрасывая при этом под действием пороховых газов вышибного порохового заряда 25 л горячей огнесмеси на расстояние от 25 до 110 м.

В годы войны наша промышленность наладила массовый выпуск огнеметов, что позволило создать целые подразделения и части фугасных огнеметов [13].

Моторизация огнеметных батальонов. Совершенствование материальной части фугасных огнеметов. В конце 1943 г. и в начале 1944 г. с учетом необходимости повышения маневренных возможностей огнеметных частей в период активных наступательных действий некоторые огнеметные батальоны были переведены на штаты омптоб.

17 декабря 1943 г. в соответствии с директивой Генерального штаба Красной армии от 17.12.1943 г. № орг 5/143028 на штат 11/037 моторизованного противотанкового был переведен 11-й огнеметный батальон²¹.

С целью перевода на штат моторизованного батальона 1 января 1944 г. был выведен из боя и приступил к изучению материальной части огнемета ФОГ-2, а также тактики действия противотанкового огнеметного батальона 13-й ооб²².

С переходом огнеметных батальонов на новые штаты количество транспорта в батальонах увеличилось, личный состав и материальная часть перемещались на автомобилях, что позволяло огнеметчикам следовать за подвижными соединениями, обеспечивая их фланги, закрепляя завоеванные рубежи и отражая контратаки германских войск. В этих условиях частям фугасных огнеметов все чаще стали поручать самостоятельные действия.

Моторизованные батальоны фугасных огнеметов стали мощным и надежным средством усиления не только общевойсковых, но и механизированных войск.

В Берлинской стратегической наступательной операции 1-й отдельный моторизо-



Рисунок 4 – Советский фугасный огнемет ФОГ-2 (рисунок адаптирован авторами из [2])

Figure 4: Soviet FOG-2 Explosive Flamethrower (illustration adapted by the authors from [2])

вместо 648 стало 540 фугасных огнеметов. Кроме того, батальон имел на вооружении 390 автоматов и 107 винтовок.

²¹ ЦАМО. Ф. 87224. Оп. 0185203с. Д. 1. Лист начала документа в деле: 1. Авторы документа: 11 омптоб, капитан Котельников.

²² Помимо 11-го и 13-го огнеметных батальонов в первой половине 1944 года на штат моторизованных противотанковых были переведены 9-й, 10-й, 18-й огнеметные батальоны. Журнал боевых действий 13 омптоб. ЦАМО. Ф. 87226. Оп. 0400628. Д. 1. Лист начала документа в деле: 1.

ванный противотанковый огнеметный батальон был придан 3-й гвардейской танковой армии, которой предстояло развивать наступление на столицу фашистской Германии с юга²³.

В боях на улицах Берлина огнеметный батальон уничтожал опорные пункты противника в приспособленных для обороны каменных домах, уничтожал огнем фугасных огнеметов и стрелкового оружия вражеских солдат, вооруженных фауст-патронами и обеспечивал продвижение танковых бригад механизированного корпуса. 30 апреля 1945 г. 1-й отдельный моторизованный противотанковый огнеметный батальон двумя огнеметными ротами поддерживал действия 70-й и 91-й танковых бригад, при этом установил и подорвал 26 фугасных огнеметов. Огнем ФОГ были сожжены 7 домов, приспособленных противником к обороне, уничтожено 4 вражеские огневые точки и 11 солдат. Огнем станковых пулеметов и автоматов были уничтожены 25 солдат и три огневые точки противника²⁴.

Работа по повышению огневой мощи батальонов проводилась еще в период формирования огнеметных батальонов, поскольку в соответствии со штатом личный состав огнеметных рот батальона вооружался автоматическим оружием взамен имевшихся ранее винтовок Мосина²⁵.

Кроме того, в декабре 1943 г. в штат моторизованного батальона была введена пулеметная рота из 9 станковых пулеметов «Максим»²⁶.

Помимо штатного вооружения в ходе войны батальоны фугасных огнеметов вооружались дополнительным, сверхштатным вооружением: ранцевыми огнеметами, противотанковыми ружьями, снайперскими винтовками, ручными и станковыми пулеметами, минометами²⁷.

Командование других фронтов также принимало меры к обеспечению батальонов фугасных огнеметов дополнительным вооружением и увеличению их огневой мощи.

В ходе боев на основе приобретенного опыта в фугасных батальонах сложились основные принципы ведения боевых действий:

- скрытность действий и тщательная маскировка позиций фугасных огнеметов;
- внезапность ввода в действие огнеметов с предельно близких дистанций – порядка 50–60 м и только на тех направлениях, где достоверно установлено нахождение противника;
- эшелонирование фугасных огнеметов в глубину в обороне и массированное применение их в наступлении из расчета один огнемет на 2–3 м фронта в один-два залпа, следующих один за другим;
- немедленное использование результатов воздействия огнеметов на противника стрелковыми подразделениями;
- тесное взаимодействие со стрелковыми, артиллерийскими частями и противотанковыми средствами.

Моторизация отдельных огнеметных батальонов, наличие в батальонах значительного количества штатного автоматического оружия и дополнительных, сверхштатных огневых средств делали батальон фугасных огнеметов равным по огневой мощи стрелковому полку средней укомплектованности (без учета полковой артиллерии) и позволяли огнеметным батальонам выполнять самостоятельные боевые задачи.

Применение отдельных батальонов фугасных огнеметов в боях за удержание плацдармов. В наступательных операциях по освобождению территории Советского Союза и стран Восточной Европы для усиления противотанковой обороны речных плацдармов наряду с другими средствами часто применялись части фугасных огнеметов.

Огнеметные батальоны придавались стрелковым дивизиям, оборонявшим плацдармы, но в отдельных случаях огнеметные части придавались в распоряжение командиров стрелковых корпусов.

Части фугасных огнеметов, выделяемые для усиления противотанковой обороны

²³ Журнал боевых действий 1 омптоб с 1 марта 1945 г. ЦАМО. Ф. 87213, Оп. 0116784с. Д. 6. Лист начала документа в деле: 2. Авторы документа: 1 омптоб.

²⁴ Боевое донесение штаба 1 омптоб. ЦАМО. Ф. 3442. Оп. 1. Д. 116. Лист начала документа в деле: 222. Авторы документа: 1 омптоб, капитан Степанов.

²⁵ По штату огнеметному батальону было положено 315 пистолетов-пулеметов, что существенно повышало его огневые возможности.

²⁶ ЦАМО. Ф. 74. Оп. 12308. Д. 278. Л. 187.

²⁷ В качестве примера существенного повышения огневой мощи огнеметных батальонов можно привести приказ начальника военно-химического управления 1-го Украинского фронта от 23 февраля 1945 г. № 03 «О создании минометных взводов огнеметных батальонов», в соответствии с которым в целях усиления огневой мощи в каждом батальоне фугасных огнеметов создавались взводы 82-мм минометов. В составе минометного взвода было 6 минометов и 18 человек личного состава.

плацдарма, использовались главным образом на одном из его флангов, обычно на том, где ожидался главный удар противника. Огнеметные части занимали позиции в боевых порядках стрелковых частей и соединений преимущественно на рубеже второй и третьей траншей. Противотанковая артиллерия располагалась на флангах боевых порядков огнеметных подразделений.

Применение отдельных рот фугасных огнеметов в боях за удержание плацдармов повышало устойчивость войск, но имело ограниченный характер, в то время как отдельные батальоны фугасных огнеметов нашли широкое применение в боях за удержание плацдармов, действуя как самостоятельно, так и в составе стрелковых соединений.

Примером обороны плацдарма служат боевые действия 4-го отдельного моторизованного противотанкового огнеметного батальона при обороне самостоятельного участка в районе Щучинка на правом берегу р. Днепр (рисунк 5).

2 октября 1943 г. 4-й отдельный моторизованный противотанковый огнеметный батальон, переправившись на правый берег р. Днепр, получил задачу от командира 52-го стрелкового корпуса 40-й армии самостоятельно оборонять участок в районе Щучинка на левом фланге 63-й гвардейской

стрелковой дивизии. К утру 4 октября огнеметные роты заняли назначенные им огневые позиции. Ширина фронта обороны составляла 3 км²⁸. Боевой порядок огнеметного батальона был построен «в линию» и занимал в глубину до 300 м. К 9 октября на огневых позициях было установлено 296 фугасных огнеметов²⁹, 9 ручных пулеметов, станковый пулемет, 6 противотанковых ружей. Батальон поддерживался двумя взводами противотанковых ружей, батареей ПТО истребительно-противотанкового дивизиона (6 орудий) и двумя батареями 120-мм минометов 1-го батальона 493-го минометного полка.

С утра 9 октября после артиллерийско-минометного обстрела и авиационной бомбардировки противник перешел в наступление. В течение дня гитлеровцы предприняли четыре атаки. В течение 10 и 11 октября батальон удерживал часть занимаемых позиций, срывая попытки противника выйти к переправам через р. Днепр. В 20.00 11 октября батальон получил другую задачу. За время ожесточенных боев с превосходящими силами противника батальоном было уничтожено: танков – 11 (из них 8 сожжено огнеметами), самолетов – 1 (сбит из автомата рядовым А.А. Горшковым), штурмовых орудий – 2 (подбиты из противотанковых ружей), пулеметов – 15, носимых огнеметов – 4, солдат и офицеров противника – до 450 человек (из них сожжено до 170 гитлеровцев)³⁰.

Оборона 4-го отдельного моторизованного противотанкового огнеметного батальона на Щучинском плацдарме показывает, что при достаточном усилении огневыми средствами он мог удерживать участок обороны самостоятельно.

В последующем за форсирование р. Днестр и овладение г. Бельцы 4-й отдельный моторизованный противотанковый огнеметный батальон был награжден орденом Красного Знамени. За овладение г. Зволнен батальон был награжден орденом Александра Невского. Ему было присвоено почетное наименование «Трансильванский» [1].

Опыт массированного применения отдельных огнеметных батальонов. К концу 1943 г. по мере накопления опыта использования отдельных огнеметных батальонов стала формироваться тенденция к дальнейшему массированию частей фугасных огнеметов путем сведения нескольких огнеметных батальонов в отдельную группу для

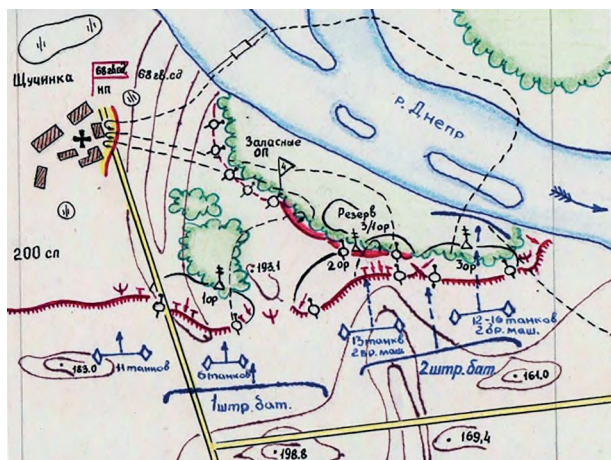


Рисунок 5 – Боевые действия 4-го моторизованного противотанкового огнеметного батальона 9–11 октября 1943 г. (схема из [1, С. 16]. Исторический архив 27 НЦ МО РФ)

Figure 5: Combat Operations of the 4th Motorized Anti-Tank Flamethrower Battalion, 9–11 October 1943 (scheme from [1, P. 16], Historical Archives of the 27 SC MD RF)

²⁸ ЦАМО. Ф. 4 омптоб. Оп. 281999. Д. 1. Л. 60–62.

²⁹ ЦАМО. Ф. 4 омптоб. Оп. 281999. Д. 1. Л. 60.

³⁰ ЦАМО. Ф. 4 омптоб. Оп. 281999. Д. 1. Л. 60–62.; Д. 2. Л. 5–11.

совместного выполнения задач оперативного значения³¹. На основе приобретенного опыта батальоны строили свои порядки с таким расчетом, чтобы огневые точки находились во взаимной огневой связи и могли создавать сплошные полосы огня как перед фронтом, так и в глубине огнеметной позиции. Для этого огнеметные батальоны разворачивались в линию углом вперед или углом назад по фронту 3–3,5 км. Лучший результат огнеметания достигался при эшелонировании огнеметов в глубину обороны. Эшелонирование огнеметных позиций в глубину заставляло наступающего противника изменять направление атаки, расстраивало его боевой порядок, затрудняло управление и содействовало уничтожению врага по частям.

Основными задачами для применения фугасных огнеметов были: прикрытие танкоопасных направлений; рубежи развертывания полковых резервов; удержание важных обороняемых объектов, таких как крупные населенные пункты, узлы дорог, железнодорожные станции. В данном случае резервы стрелковых частей имели возможность использовать успех огнеметания для окончательного уничтожения прорывающегося противника. Особенно эффективно себя показали фугасные огнеметы при защите подступов к огневым позициям артиллерии.

Эффективно себя показали подразделения фугасных огнеметов при прикрытии флангов и стыков между стрелковыми соединениями. При этом подразделения фугасных огнеметов занимали позиции на удалении 1–1,5 км от переднего края за противотанковыми и противопехотными заграждениями. Эффективность применения огнеметов достигалась при обязательной поддержке огнем пулеметов и артиллерии³².

Тенденция к укрупнению огнеметных частей сохранялась до самого окончания войны. Сводные группы огнеметных батальонов для

решения оперативных задач были созданы в войсках 2-го Украинского фронта, 3-го Белорусского фронта и на других направлениях.

В последующих сражениях тактика массированного применения огнеметных батальонов продолжала совершенствоваться.

В третьем периоде ВОВ окончательно сложились основные принципы применение батальонов ФОГ для решения задач как оборонительного, так и наступательного характера.

Применение батальонов фугасных огнеметов для обороны самостоятельных участков. В ходе ВОВ для прикрытия стыков и флангов общевойсковых соединений отдельные батальоны ФОГ применялись на самостоятельных участках обороны. При этом важнейшим условием устойчивости огнеметных батальонов являлась поддержка их действий огнем артиллерии и минометов³³.

Каждому огнеметному батальону назначался район обороны шириной 3–4 км по фронту. Командующий артиллерией армии получал задачу обеспечивать действия огнеметных батальонов огнем артиллерии и минометов³⁴. В условиях низкой активности противника отдельный моторизованный огнеметный батальон при достаточном усилении артиллерийскими средствами мог занимать и удерживать самостоятельный участок обороны до 11 км по фронту.

Применение батальонов фугасных огнеметов при штурме укрепленных городов. В наступательных операциях 1944–1945 гг. войскам Красной армии приходилось неоднократно прорывать мощную оборону противника не только позиционного типа, но и укрепленные районы. В начале 1944 г. руководство третьего рейха утвердило план создания городов-крепостей. В соответствии с этим планом крупные населенные пункты с плотной городской застройкой, являющиеся, как правило, центрами транспортных ком-

³¹ Примером массированного применения огнеметных батальонов служат бои на севере Киева в ноябре 1943 г. В этих боях при прорыве вражеской обороны в составе 3-й гвардейской танковой армии была создана группа из трех огнеметных батальонов. Для обеспечения фланга гвардейской танковой армии 2-й, 3-й и 4-й отдельные моторизованные противотанковые огнеметные батальоны действовали совместно, срывая попытку гитлеровцев осуществить прорыв по тылам армии к городу Фастов. Закрепившись на подступах к городу, группа их трех огнеметных батальонов при взаимодействии с пехотой успешно отразила все попытки контратак противника и выполнила поставленную задачу.

³² Антелепян С, Васильченко Д, Васильченко Т. Легкие пехотные и фугасные огнеметы, опыт их боевого применения. *Армейский сборник*. 2022;(10):32.

³³ В октябре 1944 г. при освобождении Советской Прибалтики в войсках 3-й ударной армии 2-го Прибалтийского фронта с целью высвобождения стрелковых частей для уплотнения других участков фронта и создания усиленных резервов 11-й и 519-й омптоб, действовавшие в составе 100-го стрелкового корпуса, находящимся в составе армии, был поручен самостоятельный участок обороны.

³⁴ ЦАМО. Ф. 992. Оп. 1. Д. 0278. Лист начала документа в деле: 196. Авторы документа: Юшкевич, генерал-майор Литвинов, генерал-майор Букштынович.

муникаций, превращались в мощные узлы обороны³⁵.

Во всех наступательных операциях Красной армии при штурме городов-крепостей огнеметные подразделения нашли самое широкое применение. Огнеметные подразделения принимали участие на всех этапах операций, начиная от подготовки и заканчивая закреплением достигнутых результатов.

При штурме городов с плотной городской застройкой, состоящей из кирпичных домов, превращенных противником в мощные узлы обороны в ряде случаев, когда буксируемая артиллерия отставала, а самоходная не могла маневрировать на узких улицах, подвижные группы фугасных огнеметчиков сопровождали штурмовые отряды и поражали огнем ФОГ огневые точки противника³⁶.

В ходе наступательных действий в населенных пунктах фугасные огнеметы использовались для массированных огнеметных атак из расчета один огнемет на 3–5 м фронта против сильно укрепленных узлов обороны на участках тесного соприкосновения с противником с целью содействия пехоте при прорыве переднего края.

Применение батальонов фугасных огнеметов при штурме Кенигсберга. Одной из выдающихся операций заключительного этапа войны является штурм столицы Восточной Пруссии города-крепости Кенигсберга. В штурме города участвовали шесть армий 3-го Белорусского фронта. На усиление армий, штурмующих Кенигсберг, были приданы семь отдельных батальонов и одна отдельная рота ФОГ.

При подготовке к операции по штурму Кенигсберга химический отдел 3-го Белорусского фронта разработал «Указания по использованию огнеметно-зажигательных и дымовых средств в боях за населенные пункты»³⁷.

В «Указаниях...» отмечалась особая роль широкого применения огнемет-

но-зажигательных и дымовых средств в боях за города и крупные населенные пункты, и давались рекомендации по их применению.

Батальоны фугасных огнеметов при прорыве внешнего оборонительного пояса предполагалось использовать совместно с истребительно-противотанковыми частями в качестве противотанковых резервов и располагать на танкоопасных направлениях в готовности к отражению контратак танков противника, а при переносе боевых действий внутрь городских кварталов к их задачам добавлялось обеспечение продвижения штурмовых групп³⁸.

«Указания...» фронта были разосланы в штабы армий, корпусов и дивизий, и на их основе штабы и химические отделы армий разработали свои документы, в которых были уточнены и конкретизированы вопросы применения огнеметно-зажигательных и дымовых средств.

В «Указаниях по применению огнеметно-зажигательных и дымовых средств при штурме города и крепости Кенигсберг», разработанных штабом 11-й гвардейской армии, ставились задачи и определялись способы применения батальонов фугасных огнеметов³⁹.

В соответствии с «Указаниями...» 11-й гвардейской армии для обеспечения штурмовых отрядов и групп внутри городских кварталов огнем ФОГ из состава батальона формировались подвижные группы огнеметчиков. В подготовительный период подвижные группы фугасных огнеметчиков должны были вместе со штурмовыми отрядами практически отработать следующие вопросы:

- быстрое оборудование огневых рубежей на площадях, улицах и перекрестках населенных пунктов;
- отработка приемов крепления фугасных огнеметов к деревьям, телеграфным столбам,

³⁵ На территории Белоруссии такими городами-крепостями были объявлены Витебск, Орша, Могилев и другие города.

³⁶ ЦАМО. Ф. 992. Оп. 1. Д. 0278. Лист начала документа в деле: 196. Авторы документа: Юшкевич, генерал-майор Литвинов, генерал-майор Букштынович.

³⁷ Документ по своему характеру был «Указаниями...», но фактически являлся приказом, поскольку был подписан командующим войсками фронта, членом военного совета и начальником штаба фронта. Документ содержал приказную часть и был обязательным к исполнению всеми командующими, командирами, а также должностными лицами, отвечавшими за использование и боевое применение огнеметно-зажигательных и дымовых средств.

ЦАМО. Ф. 1485. Оп. 1. Д. 130. Лист начала документа в деле: 154. Авторы документа: 3 БелФ, маршал Советского Союза Василевский, генерал-лейтенант Макаров, генерал-полковник Покровский.

³⁸ Солнцев В. Огнеметчики штурмуют город-крепость. *Красная Звезда*. 2021 сентября 29;108:10.

³⁹ ЦАМО. Ф. 1080. Оп. 1. Д. 82. Лист начала документа в деле: 220. Авторы документа: 11 гв. А, гв. генерал-полковник Галицкий, гв. генерал-майор танк. войск Куликов, гв. генерал-лейтенант Семенов.

железным и каменным перилам и оконным проемам (рисунки 6, 7);

- оборудование огневых рубежей и снятие с огневых позиций фугасных огнеметов под прикрытием дымовой завесы;

- оборудование огневых рубежей в виде «огненного коридора».

Батальоны ФОГ было признано целесообразным использовать централизованно по плану командиров стрелковых корпусов. При этом допускалось поротное подчинение огнеметчиков командирам стрелковых дивизий.

Для закрепления занятого рубежа роте ФОГ предписывалось занимать оборону на фронте до 500 м, а в боевых порядках стрелкового полка – до 800 м. При этом позиции огнеметной роты должны быть усилены тремя станковыми пулеметами из состава пулеметной роты огнеметного батальона и тремя-четырьмя орудиями противотанковой артиллерии⁴⁰.

Роты ФОГ, приданные стрелковым дивизиям, не включались в состав штурмовых

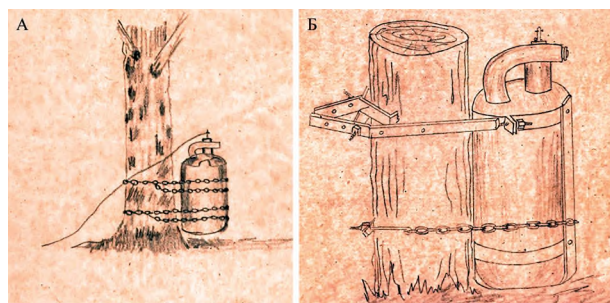


Рисунок 6 – Крепление ФОГ-2 к дереву (А) и другим местным предметам (Б) при помощи специально приспособленных цепей и металлического комбинированного каркаса (Альбом схем к работе гв. инженер-подполковника Левина: «Использование огнеметно-зажигательных средств в боях за города и крупные населенные пункты по опыту Отечественной войны». ВАХЗ Советской Армии им. К.Е. Ворошилова, 1948 г. Сх. № 17, 19. Исторический архив 27 НЦ МО РФ)

Figure 6: FOG-2 mounting systems to trees (A) and local objects (B) using adapted chains and combined metal frames (from the Schematic Album to the Work by Guards Engineer-Lt. Col. Levin: "Ispol'zovanie ognemetno-zazhigatel'nyh sredstv v bojah za goroda i krupnye naselennye punkty po opytu Otechestvennoj vojny". VAHZ Sovetskoy Armii im. K.E. Voroshilova, 1948. Sh. № 17, 19. Historical Archives of the 27 SC MD RF)

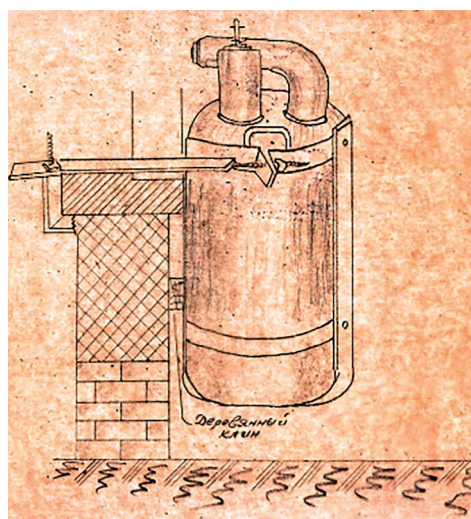


Рисунок 7 – Крепление ФОГ-2 к подоконнику с помощью комбинированного металлического каркаса (Альбом схем к работе гв. инженер-подполковника Левина: «Использование огнеметно-зажигательных средств в боях за города и крупные населенные пункты по опыту Отечественной войны». ВАХЗ Советской Армии им. К.Е. Ворошилова, 1948 г. Сх. № 20. Исторический архив 27 НЦ МО РФ)

Figure 7: FOG-2 mounting to windowsill using combined metal frame (from the Schematic Album to the Work by Guards Engineer-Lt. Col. Levin: "Ispol'zovanie ognemetno-zazhigatel'nyh sredstv v bojah za goroda i krupnye naselennye punkty po opytu Otechestvennoj vojny". VAHZ Sovetskoy Armii im. K.E. Voroshilova, 1948. Sh. № 20. Historical Archives of the 27 SC MD RF)

отрядов и не придавались им, а использовались командиром стрелковой дивизии для закрепления захваченных рубежей на танкоопасных и наиболее опасных для контратак пехоты направлениях.

На основе накопленного опыта химическими отделами фронта и армий были выработаны основные принципы использования подвижных групп ФОГ:

- перед атакой переднего края противника подвижные группы устанавливаются на исходном рубеже 4–6 фугасных огнеметов и до того, как определится успех атаки, находятся в готовности к отражению контратак противника;

- при выполнении задач закрепления отдельных зданий и кварталов, захваченных штурмовыми отрядами и группами,

⁴⁰ В «Указаниях...» была поставлена задача выделения подвижных групп фугасных огнеметов из огнеметных батальонов ФОГ в составе: 10 огнеметчиков, вооруженных 10 фугасными огнеметами, 2 сержантов и 1 офицера. Подвижная группа ФОГ должна быть обеспечена грузовым автомобилем и действовать в составе подгруппы закрепления штурмового отряда. Закрепление рубежа подвижная группа ФОГ должна была производить установкой 4–6 фугасных огнеметов, а остальные иметь в резерве.

подвижные группы устанавливают ФОГ без закапывания их в землю с таким расчетом, чтобы подъезды и подходы к зданиям перекрывались двухслойным огнем огнеметов. Для закрепления квартала огнеметы должны располагаться с расчетом прикрытия подходов к улице со стороны противника;

- по мере продвижения штурмового отряда вперед подвижная группа закрепляет новые рубежи резервными огнеметами, одновременно снимая огнеметы с прежнего рубежа.

В ходе штурма Кенигсберга фугасные огнеметчики выполняли все тактические задачи, которые на них возлагались: проводили огнеметную подготовку атаки, закреплялись на захваченных рубежах, обеспечивали продвижение стрелковых подразделений, отражали контратаки противника.

Применение батальонов фугасных огнеметов при штурме Бреслау. На тех же принципах было основано применение подразделений фугасных огнеметов во время штурма других городов Восточной Европы, в частности, при штурме города Бреслау (современный Вроцлав). Этот город, как и Кенигсберг, был превращен противником в сильный укрепленный район и имел численность гарнизона, включая подразделения фольксштурма, около 60 тыс. человек.

В ходе штурма Бреслау для обеспечения успеха стрелковых подразделений огнеметчики неоднократно производили огнеметную атаку по позициям противника⁴¹.

В процессе штурма города огнеметные подразделения вместе с материальной частью перемещались непосредственно за боевыми порядками пехоты и в случаях упорного сопротивления противника по приказам командиров стрелковых батальонов огнем фугасных огнеметов прокладывали ей путь.

В ходе уличных боев в городе Бреслау огнеметные подразделения неоднократно исполь-

зовались для прикрытия флангов на стыках стрелковых частей, особенно на направлениях вероятных контратак противника.

12 марта 1945 г. в районе городского квартала 633 взвод огнеметчиков под командованием младшего лейтенанта З. Рояк 25-го огнеметного батальона прикрывал фланг 2-го батальона 667-го стрелкового полка. В 13.30 подрывом пяти фугасных огнеметов взвод отразил атаку во фланг батальона сильной группы пехоты противника. При этом красноармеец Ревякин, вооруженный трофейным пулеметом, собрал вокруг себя группу огнеметчиков и стрелков, и под прикрытием сильного автоматического огня устранил повреждения огнеметов. Через некоторое время противник вновь попытался атаковать на том же участке, но эта атака была отбита подрывом восьми фугасных огнеметов⁴².

Применение батальонов фугасных огнеметов при штурме Берлина. При штурме Берлина из состава огнеметных рот формировались подвижные группы фогистов (фугасных огнеметчиков – *прим. авторов*), которые усиливали штурмовые группы.

Огнем фугасных огнеметов штурмовики прокладывали себе путь в кирпичные, хорошо укрепленные здания с целью их освобождения от германских солдат.

28 апреля 1945 г. в 12.20 по сигналу командира 117-го гвардейского стрелкового полка фугасные огнеметы были подорваны, и огнеметчики вместе со стрелковыми подразделениями ворвались в укрепленные здания. Не выдержав напора наших штурмовых групп, немецкие солдаты ушли в подземные цеха и продолжали оказывать упорное сопротивление. В этих условиях командиры 1-го и 2-го огнеметных взводов проделали по пять проломов в потолке подземных цехов, куда залили более 300 л трофейной огнесмеси и подожгли ее, после чего гарнизон немецкого узла сопротивления капитулировал.

⁴¹ При штурме квартала 635, превращенного противником в ряд мощных оборонительных пунктов, для обеспечения продвижения подразделений 667-го стрелкового полка огнеметная атака проводилась силами 3-й огнеметной роты 25-го ооб. В ночь на 3 марта 1945 г. на фронте 150 м было установлено 70 фугасных огнеметов. Большая часть огнеметов была установлена в окнах домов и подвалов, а 21 фугасный огнемет был установлен в асфальте и грунте возле домов. После проведенной артиллерийской подготовки по команде командира стрелкового полка были подорваны три сигнальных огнемета командира роты, вслед за ними были одновременно подорваны остальные 67 огнеметов. Мощный огневой вал привел в замешательство противника, который после окончания артиллерийского налета начал занимать места у своих огневых средств. В этих условиях взвод огнеметчиков под командованием младшего лейтенанта Елисеева ворвался в два дома, захватил вражеский пулемет и его огнем начал очищать дома от гитлеровцев. Стрелковые подразделения двинулись вперед вслед за огнеметчиками. В результате огнеметной атаки было уничтожено 30 немецких солдат, очищено от солдат противника и разрушено 9 домов.

⁴² Использование фугасных огнеметов в уличных боях города-крепости Бреслау. ЦАМО. Ф. 236. Оп. 2673. Д. 2009. Лист начала документа в деле: 64. Авторы документа: 6 А, подполковник Москвин.

В результате боя огнеметчиками было уничтожено 185 и захвачено в плен 120 вражеских солдат и офицеров⁴³.

1 мая 1945 г. продвижение штурмовых групп 74-й гвардейской стрелковой дивизии в районе Анхальтского вокзала Берлина было задержано сильным огнем автоматического оружия и применением фауст-патронов противником. Задача по выжиганию немецких солдат из здания вокзала и обеспечению дальнейшего продвижения стрелковых подразделений была поставлена огнеметчикам 19-го огнеметного батальона.

Подвижные группы фугасных огнеметчиков под сильным огнем противника выдвинулись к зданию вокзала и, установив огнеметы, произвели огнеметание. При этом было сожжено четыре сильно укрепленных дома, прикрывавших подступы к зданию вокзала. Вражеский гарнизон, оборонявший вокзал, скрылся в подвальных помещениях. Огнеметчики ворвались в здание вокзала, проделали отверстия в полу и огнем фугасных огнеметов уничтожили 170 вражеских солдат.

Общий итог действий 19-го огнеметного батальона в боях за Берлин подвел начальник военно-химического управления 1-го Белорусского фронта в наградном листе на командира батальона. Представляя подполковника Куликова Петра Владимировича к награждению орденом Ленина, генерал-майор технических войск Ботвинник А.С. отметил, что во время уличных боев в Берлине огнеметный батальон сжег 35 сильно укрепленных домов, 12 огневых точек, склад с боеприпасами, свыше 1,2 тыс. вражеских солдат и офицеров. При этом взято в плен 500 гитлеровцев⁴⁴.

В условиях подвижного уличного боя в крупном населенном пункте было исключено массированное применение фугасных огнеметов на широком фронте. Только на направлениях вероятных контрударов противника с целью создания прочной обороны фугасные огнеметы использовались в больших количествах. Следовательно, групповые действия фугасных огнеметов были наиболее часто встречающимся видом их использования при штурме городов. Грамотное использование фугасных огнеметов в уличных боях позволяло успешно решать боевые задачи при минимальных потерях своих подразделений. Использование подвижных групп фугасных огнеметчиков непосредственно в боевых по-

рядках стрелковых подразделений обеспечивало тесное взаимодействие и непрерывное управление. Для обеспечения действий подвижных групп фугасных огнеметчиков при штурме городов необходимым условием было повышение подвижности самих фугасных огнеметов. С этой целью применялись колесные установки. Широко использовались цепные приспособления, которые позволяли производить огнеметание через улицу.

В боях за крупные населенные пункты части фугасных огнеметов показали свою эффективность при выполнении задач огнеметной подготовки атаки, выжигании противника из укрепленных зданий и подвалов, а также закреплении захваченных рубежей и отражении вражеских контратак.

Через год после окончания ВОВ в Военной академии химической защиты имени К.Е. Ворошилова состоялась конференция по освещению опыта применения огнеметно-зажигательных средств в ВОВ, на которой были подведены итоги применения частей фугасных огнеметов. Особо было отмечено, что в ходе войны фугасные огнеметы показали себя довольно сильным средством борьбы с танками и пехотой противника.

На конференции отмечалось, что боевая эффективность применения фугасных огнеметов за время ВОВ характеризовалась следующими данными: уничтожено противника ружейно-пулеметным огнем 20505 человек, огнеметанием 18824 человека, танков и самоходных орудий 362, различных огневых точек 1468, автомашин 224 [14].

При этом было отмечено, что наиболее эффективно подразделения фугасных огнеметов применялись в условиях оборонительного боя. Несмотря на то, что процент участия частей фугасных огнеметов в наступательных боях значительно выше, чем в оборонительных, тем не менее, характер их действий в наступательных операциях зачастую сводился к решению оборонительных задач, а именно, к закреплению захваченных рубежей, обороне плацдармов, обеспечению флангов и стыков наступающих войск в глубине обороны противника.

Моральное воздействие от применения фугасных огнеметов на противника оказывалось более сильным, чем от применения зажигательных бутылок и ранцевых огнеметов. Данный вывод был сделан на основе многочисленных фактов, когда танки или

⁴³ Боевой путь 19 ооб. ЦАМО. Ф. 87232. Оп. 0350118с. Д. 1. Лист начала документа в деле: 2. Авторы документа: 19 ооб.

⁴⁴ Указ Президиума Верховного Совета СССР и наградной лист с описанием подвига и заслуг Куликова П.В. ЦАМО. Ф. 33. Оп. 686046. Д. 170.

пехота противника, попав под действие огня фугасных огнеметов на одном узком направлении, обычно прекращали атаку и уходили, стремясь обойти участок, занятый подразделениями ФОГ.

Психологический эффект распространялся не только на те войска, которые непосредственно попадали под огонь ФОГ, но и на войска противника, действующие справа и слева от этого направления, тогда как действия бутылок и ранцевых огнеметов сказывались только на тех, кто непосредственно попадал в зону их действия.

Эффективность частей фугасных огнеметов проявилась не только в поражающем действии собственно ФОГ, но и в использовании других боевых средств, состоящих на вооружении огнеметных батальонов. Эти боевые средства, как штатные, так и сверхштатные, наносили потери живой силе противника несколько больше, чем собственно фугасные огнеметы. Данное обстоятельство позволяло использовать отдельные огнеметные батальоны в некоторых случаях для самостоятельной обороны при наличии артиллерийско-минометной поддержки.

Первый период ВОВ характеризовался принятием на вооружение фугасного огнемета и формированием отдельных рот фугасных огнеметов. В этот период вырабатывалась и совершенствовалась тактика боевого применения отдельных фугасно-огнеметных рот, которые, главным образом, применялись в оборонительных боях для защиты танкоопасных направлений, для поддержки наших подразделений при разведке боем, для блокировки и уничтожения отдельных огневых точек противника. Кроме того, предпринимались попытки повышения маневренности как самого фугасного огнемета на поле боя путем его установки на различные салазки и тележки, так и огнеметной роты в целом путем замены гужевого транспорта автомобильным.

В течение второго периода ВОВ вырабатывалась и совершенствовалась тактика применения отдельных рот фугасных огнеметов, которые использовались для прикрытия флангов в наступательных операциях Красной армии. Во II и III периодах на вооружение огнеметных частей поступали усовершенствованные фугасные огнеметы ФОГ-2. Кроме того, в это время нашло широкое при-

менение колесных установок и различных приспособлений для крепления фугасных огнеметов, что обеспечивало их быстрое перемещение и установку в динамике наступательного боя.

Второй период ВОВ был также характерен формированием отдельных батальонов ФОГ. В течение короткого времени в Красной армии были сформированы 27 отдельных огнеметных батальонов, а в третьем периоде войны – 2 огнеметных батальона в Войске Польском.

В течение II и начале III периода войны проходило совершенствование штатной структуры батальонов – часть батальонов была переведена на штаты моторизованных, в штаты которых были введены пулеметные роты. Все огнеметные батальоны активно укомплектовывались автомобильной техникой и сверхштатным вооружением. В течение этого времени вырабатывались основные принципы применения огнеметных батальонов.

Третий период ВОВ характерен совершенствованием тактики огнеметных батальонов: они стали применяться как по отдельности, так и в группе огнеметных батальонов для решения самостоятельных боевых задач – обороны отдельных участков, прикрытия флангов наступающих группировок. Получило широкое распространение применение подвижных групп фугасных огнеметов для обеспечения продвижения стрелковых и механизированных частей и закрепления достигнутых рубежей. В наступательных операциях Красной армии отдельные огнеметные батальоны стали активно применяться для усиления стрелковых соединений на направлениях главных ударов армий (корпусов).

За годы ВОВ подразделениями фугасных огнеметов уничтожено 12 тыс. единиц живой силы противника, 362 самоходные установки и танка, 224 автомашины, 1400 ДЗОТ и других огневых точек. Ружейно-пулеметным огнем огнеметчиков уничтожено 21 тыс. солдат и офицеров противника⁴⁵.

За образцовое выполнение боевых заданий командования 20 огнеметных батальонов получили почетные названия «Берлинский», «Неманский» и др. Награждены боевыми орденами 25 отдельных огнеметных батальонов [15].

⁴⁵ Данные, приведенные в книге «Войска радиационной, химической и биологической защиты. 90 лет» [15] частично отличаются от данных, приведенных в Материалах конференции по применению огнеметно-зажигательных средств в Отечественной войне в виду разных исходных данных для подсчета (*Примечание авторов*).

Заключение

Проведенный анализ применения фугасных огнеметов показал:

1. В годы Великой Отечественной войны отдельные части фугасных огнеметов успешно решали боевые задачи во всех видах боя – как в обороне, так и в наступлении.

2. В обороне фугасные огнеметы использовались для уничтожения атакующих групп танков и пехоты противника. Они способствовали повышению устойчивости наших войск, отражению контратак противника и созданию условий для перехода в контратаки стрелковых подразделений.

3. При ведении наступательных боевых действий подразделения и части фугасных огнеметов надежно обеспечивали фланги наступающих группировок войск, закреплялись на достигнутых рубежах и удерживали их. При штурме городов в условиях ведения боя в тесных кварталах с плотной застройкой каменными домами подвижные группы фугасных огнеметчиков успешно поражали огневые точки противника, создавая условия для продвижения штурмовых групп.

4. Части фугасных огнеметов использовались в основном централизованно в тесном взаимодействии с истребительно-противотанковой артиллерией, пехотой и инженерными войсками. В наступательных боях подвижные группы фугасных огнеметчиков действовали совместно со штурмовыми отрядами и штурмовыми группами.

Исследование применения огнеметно-фугасных частей и подразделений позволило выявить и описать полную картину формирования подразделений и частей фугасных огнеметов, развития тактики их применения в ходе II и III периодов ВОВ. Если I период войны характеризовался формированием отдельных рот фугасных огнеметов и непрерывным увеличением их количества, то во II и III периодах были сформированы отдельные огнеметные батальоны, причем третья часть которых, девять батальонов из двадцати семи, были полностью моторизованными. Отдельные огнеметные батальоны помимо фугасных огнеметов имели на вооружении значительное количество автоматического стрелкового вооружения, сверхштатного огнеметного, стрелкового и артиллерийского вооружения и по суммарной огневой мощи равнялись стрелковому полку средней укомплектованности без полковой артиллерии.

III период войны характеризовался тенденцией к дальнейшему массированию применения частей фугасных огнеметов, вследствие чего батальоны фугасных огнеметов в отдельных случаях применялись группами по три батальона под единым командованием, и даже были примеры формирования отдельных огнеметных бригад.

Таким образом, во II и III периодах ВОВ огнеметные батальоны решали не только тактические, но и оперативные задачи в армейских и фронтовых операциях.

В современных условиях представляется целесообразным наличие на вооружении Российской армии небольшого по массогабаритным размерам, простого по конструкции и относительно недорогого в производстве фугасного огнемета, установленного на подвижную платформу с дистанционным управлением, с применением огнесмесей с увеличенной дальностью огнеметания. Возможно применение фугасных огнеметов (фугасных огнеметных зарядов) в составе подвижных роботизированных комплексов.

Учитывая мощное морально-психологическое воздействие на противника, фугасные огнеметы в современных боевых действиях могут применяться для решения следующих боевых задач:

1. Выжигание противника из долговременных укрепленных сооружений (шахты, подземные коммуникации, тоннели, подвалы и т.д.).

2. Закрепление достигнутых рубежей, повышение глубины и устойчивости обороны подразделений.

3. Борьба с диверсионно-разведывательными группами противника.

4. Прикрытие наиболее опасных направлений в условиях очаговой (маневренной) обороны и отсутствии сплошной линии оборонительных позиций.

5. Заблаговременная установка фугасных огнеметов дистанционного действия на участках предполагаемого прорыва обороны ДРГ, десанта и штурмовых групп противника.

Боевое применение фугасных огнеметов в современных условиях переходит на уровень решения отдельных тактических задач, которые не могут быть решены или ограничено решены путем применения тяжелых огнеметных систем и реактивных пехотных огнеметов.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Данная работа имеет ряд ограничений, а именно: исследование основывается на анализе открытых источников, включая литературные источники, очерки, воспоминания ветеранов, архивные материалы и

открытую научную литературу / This analytical review has a number of limitations, such as: the study is based on the analysis of the open sources, including papers, essays and memoirs of war veterans, archive documents and open sources scientific publications.

Список источников / References

1. Дмитриев ДМ, Якубов ВЕ. Боевой опыт химических войск и химической службы в Великой Отечественной войне (1941-1945 гг.), Сборник примеров. М.: Воениздат; 1989.
Dmitriev DM, Yakubov VE. *Combat Experience of Chemical Troops and Chemical Service in the Great Patriotic War (1941-1945): A Collection of Examples*. Moscow: Voenizdat; 1989. P. 5 (in Russian).
2. Ардашев АН. Огнеметные танки и ручные огнеметы в бою. М.: Яуза, Эксмо; 2014. 258 с.
Ardashov AN. *Flamethrower Tanks and Portable Flamethrowers in Battle*. Moscow: Yauza, Eksmo; 2014. 258 p. (in Russian).
3. Химические войска Советской Армии. М.: Воениздат; 1987. С. 36-38.
Chemical Troops of the Soviet Army. Moscow: Voenizdat; 1987. P. 36-38 (in Russian).
4. Временное руководство по подготовке фугасных огнеметчиков. Управление Военно-химической защиты Красной Армии. М.: Военное Издательство Комиссариата Обороны Союза ССР; 1941. С. 3-5.
Provisional Manual on the Training of Fougasse Flamethrower Operators. Directorate of Chemical Defense of the Red Army. Moscow: Military Publishing House of the USSR People's Commissariat of Defense; 1941. P. 3-5 (in Russian).
5. Труды научно-исследовательского отдела Института военной истории. Т. 1. Военно-химическое дело: (специальный выпуск). Санкт-Петербург: Политехника-сервис; 2011. С. 181.
Proceedings of the Research Department of the Institute of Military History. Vol. 1. Military Chemical Affairs (Special Issue). Saint Petersburg: Politekhnik-Servis; 2011. P. 181 (in Russian).
6. Ермолаев АВ, Гетьман ОМ, Жидков ДА, Сердюк ВА. Совершенствование организационно-штатной структуры огнеметных частей и подразделений в годы Великой Отечественной войны. В: Правда и вымыслы о Второй мировой войне: истоки, причины, итоги и уроки величайшей трагедии в истории человечества: Материалы Всероссийской военно-исторической конференции с международным участием. Часть 1. Кострома: ВА РХБЗ; 2022. С. 308.
Ermolaev AV, Getman OM, Zhidkov DA, Serdyuk VA. Improvement of the Organizational and Staff Structure of Flamethrower Units During the Great Patriotic War. In: Truth and Myths About World War II: Origins, Causes, Outcomes, and Lessons of the Greatest Tragedy in Human History: Proceedings of the All-Russian Military-Historical Conference with International Participation. Part 1. Kostroma: RChB Defense Academy; 2022. P. 308 (in Russian).
7. Солнцев ВВ. Огнеметчики и огнеметы. Боевой путь 26-й отдельной фугасно-огнеметной Краснознаменной роты и 14-го отдельного огнеметного Неманского ордена Александра Невского батальона. М.: Наш круг; 2023. С. 29.
Solntsev VV. *Flamethrowers and Flamethrower Units: The Combat Path of the 26th Separate Fougasse-Flamethrower Red Banner Company and the 14th Separate Neman Order of Alexander Nevsky Flamethrower Battalion*. Moscow: Nash Krug; 2023. P. 29 (in Russian).
8. Старков ЕГ, Ковтун ВА, Полищук ИП, Смирнов АМ, Малеев В.Н, Супотницкий МВ, и др. Войска радиационной, химической и биологической защиты. 100 лет. Кириллов ИА, ред. М.; 2018. С. 181.
Starkov EG, Kovtun VA, Polishchuk IP, Smirnov AM, Maleev V.N, Supotnickij MV, et al. *Radiation, Chemical, and Biological Defense Troops: 100 Years*. Kirillov IA, Ed. Moscow; 2018. P. 181 (in Russian).
9. Жилин ИА, Банников МК. Применение огнеметов войсками Советской Армии в Великой Отечественной Войне 1941-1945 гг. Боевые примеры. М.: Воениздат; 1949. С. 48.
Zhilin IA, Bannikov MK. *The Use of Flamethrowers by the Soviet Army in the Great Patriotic War (1941-1945): Combat Examples*. Moscow: Voenizdat; 1949. P. 48 (in Russian).
10. Малинка АН, Анисимов АВ, Карташов АК. Химическое обеспечение войск в годы Великой Отечественной войны. Вестник КГУ. 2020;(2):79-80.
Malinka AN, Anisimov AV, Kartashov AK. Chemical Support of Troops During the Great Patriotic War. *Vestnik KGU*. 2020;(2):79-80 (in Russian).
11. Красильников МВ, Петров ГИ. История химической службы и войск химической защиты Советской Армии. М.: ВАХЗ; 1958. С. 125.
Krasilnikov MV, Petrov GI. *History of the Chemical Service and Chemical Defense Troops of the Soviet Army*. Moscow: Military Academy of Chemical Defence; 1958. P. 125 (in Russian).
12. Зеляев АФ. Устройство и эксплуатация фугасных огнеметов. М.: Военное издательство НКО; 1944. С. 11, 14.
Zelyaev AF. *Design and Operation of Fougasse Flamethrowers*. Moscow: Military Publishing House of the People's Commissariat of Defence; 1944. P. 11, 14 (in Russian).

13. Ардашев АН. Огнемётно-зажигательное оружие. Иллюстрированный справочник. М.: Яуза, Эксмо; 2001. С. 110-1.
Ardashov AN. Flamethrower and Incendiary Weapons: An Illustrated Reference Guide. Moscow: Yauza, Eksmo; 2001. P. 110-1 (in Russian).
14. Постнов ПС. Огнемётно-зажигательные средства в Отечественной войне. В: Материалы конференции по применению огнемётно-зажигательных средств в Отечественной войне. М.; 1946. С. 20.
Postnov PS. Flamethrower-incendiary weapons in the Patriotic War. In: *Proceedings of the conference on the use of flamethrower-incendiary weapons in the Patriotic War*. Moscow; 1946. P. 20 (in Russian).
15. Кучинский ЕВ, Аксенов ВА, Васильев НТ, и др. Войска радиационной, химической и биологической защиты. 90 лет. Старков ЕГ, ред. М.: Си-Эс-Ди; 2018. С. 62.
Kuchinskiy EV, Aksenov VA, Vasilyev NT, et al. *Radiation, Chemical, and Biological Defence Troops: 90 Years*. Starkov EG, Ed. Moscow: CSD; 2018. P. 62 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **В.В. Попов** – формирование концепции статьи, сбор, анализ и систематизация информации, изложенной в исторической литературе, написание текста, разработка иллюстративного материала, окончательное утверждение версии рукописи для публикации; **А.М. Смирнов** – анализ данных исторической литературы, написание статьи, критический пересмотр и коррекция текста рукописи; **В.В. Солнцев** – сбор и анализ сведений об опыте применения подразделений фугасных огнемётов в годы Великой Отечественной войны, написание текста; **В.А. Лагашкин** – анализ исторической литературы, критический пересмотр и коррекция текста рукописи; **С.В. Колосович** – редактирование статьи, приведение терминологии современным требованиям руководящих документов, доработка текста / All authors confirm that their participation meets the ICMJE criteria for authorship. The primary contributions are distributed as follows: **V.V. Popov**: Conceptualization of the article, collection, analysis, and systematization of historical data, manuscript writing, development of illustrative materials, and final approval of the manuscript for publication. **A.M. Smirnov**: Analysis of historical literature, manuscript writing, critical review, and text revision. **V.V. Solntsev**: Collection and analysis of data on the combat deployment of explosive flamethrower units during the Great Patriotic War, manuscript writing. **V.A. Lagashkin**: Analysis of historical literature, critical review, and text revision. **S.V. Kolosovich**: Manuscript editing, modernization of terminology in accordance with current regulatory standards, and text refinement.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Попов Валерий Владимирович. Научный сотрудник отдела.

Смирнов Александр Михайлович. Начальник отдела, канд. техн. наук.

Солнцев Виктор Владимирович. Младший научный сотрудник отдела.

Лагашкин Валерий Александрович. Научный сотрудник отдела.

Колосович Светлана Владимировна. Научный сотрудник отдела

Контактная информация для всех авторов: 27 nc_1@mil.ru
Контактное лицо: Попов Валерий Владимирович; 27 nc_1@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Valery V. Popov. Researcher.

Aleksandr M. Smirnov. Head of the Department. Dr Sci. (Techn.).

Victor V. Solntsev. Junior Research.

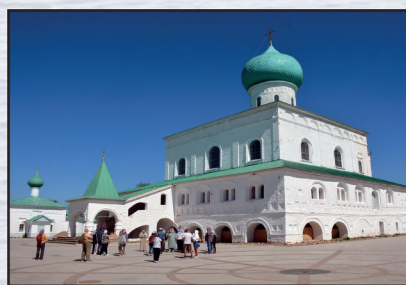
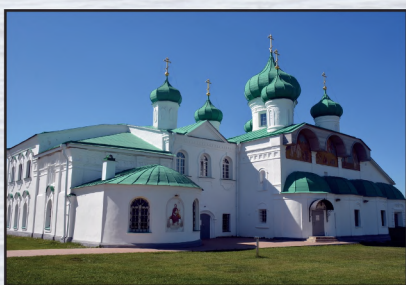
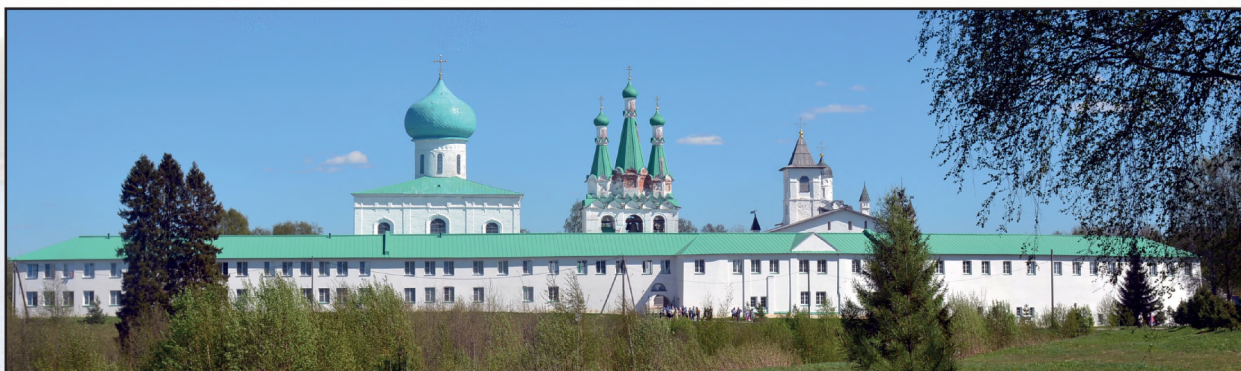
Valery A. Lagashkin. Researcher.

Svetlana V. Kolosovich. Researcher.

Contact information for all authors: 27 nc_1@mil.ru
Contact person: Valery V. Popov; 27 nc_1@mil.ru

Наша замечательная Россия

«Северная Лавра» – Александро-Свирский монастырь



Свято-Троицкий Александро-Свирский монастырь – мужской монастырь Тихвинской епархии Русской православной церкви, находится в 260 км от Санкт-Петербурга и в 21 км от районного центра г. Лодейное Поле на берегу Рошинского озера. Монастырь основан святым преподобным Александром Свирским (1448–1533) в конце XV века в глухом Олонецком крае среди языческого коренного населения. При жизни основателя обитель складывалась как два связанных друг с другом, но независимо расположенных комплекса (отделения): Троицко-го с братскими кельями и Архиерейским домом и Преображенского – рядом с кладбищем и домом настоятеля. Их связывает дорога, идущая вдоль озера. В XIX в. монастырь почитался также как и Киево-Печерская, Троице-Сергиева и Александро-Невская лавры, отсюда название – «Северная Лавра». После революции монастырь был закрыт и разграблен. В 1931–1937 гг. в монастыре располагался один из лагерных пунктов Свирлага. В 1997 г. монастырь был передан Русской православной церкви. С этого времени восстанавливаются здания, реставрируются фрески и купола, возобновлена монашеская жизнь и ежедневные службы.

Верхний ряд: Троицкий комплекс монастыря (верхнее фото) и Преображенский комплекс (нижнее фото). Фотографии нижнего ряда. Слева – самое древнее строение монастыря – церковь Покрова Божией Матери, построена в новгородском стиле преп. Александром в 1533 г. Строительство велось на пожертвования Великого князя Василия III (1479–1533). В центре – пятиглавый Спасо-Преображенский собор (1641–1644). Царь Михаил Федорович подарил монахам золотой ковчег для хранения в соборе мощей святого Александра. Справа – каменный собор Живоначальной Троицы. Построен в 1791 г., но прежде на этом месте была деревянная церковь, построенная самим основателем монастыря в 1509 г. В качестве образца строители выбрали Знаменский собор в Новгороде.

Фотографии М.В. Супотницкого



Сайт журнала



РИНЦ



ISSN 2587-5728
9 772587 572003 >