

ТЕМА НОМЕРА:

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
СОБЛЮДЕНИЯ КОНВЕНЦИЙ
О ЗАПРЕЩЕНИИ ХИМИЧЕСКОГО
И БИОЛОГИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ФГБУ «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации

JOURNAL OF NBC
PROTECTION CORPS

ВЕСТНИК ВОЙСК РХБ ЗАЩИТЫ

В НОМЕРЕ:

- Мир вступил в эпоху синтетического биологического оружия
- Наночастицы как потенциальные агенты химического и биологического оружия
- Новые ферментные мишени для фосфорорганических соединений

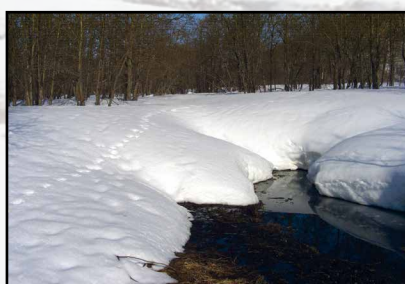
Том 6, № 4

октябрь-декабрь

2022

Наша замечательная Россия

Термальное поле в Малках, Камчатка



Одним из интереснейших природных явлений на Камчатке являются ее подземные воды. Те, что выходят концентрированными струями – образуют термальное поле в виде отдельного фумарола или гейзера (о них речь на третьей полосе обложки). В случае, когда восходящий горячий поток разветвляется на мелкие струи, образуются термальные поля с теплыми грязевыми болотцами, озерцами и лужами. Такое поле есть в 130 км от г. Петропавловска-Камчатского в красивой долине, в районе реки Ключевки – это Малкинские горячие источники. Вода выбивается из шести грифонов и имеет температуру до 84 °С. Здесь туристами вырыты многочисленные бассейны (лужи) на песчано-галечном основании. По бальнеологической характеристике Малкинские горячие источники являются представителями камчатской группы кремнисто-щелочных, гидрокарбонатно-сульфатных вод. Показания к применению вод: заболевания опорно-двигательного аппарата, поражения периферической нервной системы, кожные болезни. Доехать до Малкинских источников можно от Петропавловска-Камчатского в составе туристической группы, на арендованном автомобиле или городским автобусом. По пути можно сделать остановку в знаменитом на всю Камчатку своими гигантскими и удивительно вкусными пирожками поселке Сокоц.

Верхняя фотография – река Ключевка, справа термальное поле с вырытыми туристами небольшими бассейнами. На дальнем плане виден такой бассейн с поднимающимся над ним паром. Вода в луже на переднем плане справа настолько горячая, что лучше в нее не наступать.

Фотографии внизу: слева – там где земля прогревается термальной водой, растут одуванчики, а рядом лежат сугробы снега; в центре – здесь повсюду ручьи, «следы невиданных зверей» и удивительно чистый снег; справа – одно из небольших озер, наполненное теплой водой.

Фотографии М.В. Супотницкого



Журнал издается
с 2017 года

ВЕСТНИК ВОЙСК РХБ ЗАЩИТЫ

ISSN 2587-5728
(Print)

Том 6, № 4
2022 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.

Импакт-фактор журнала по Российскому
индексу научного цитирования за 2021 г.:

двухлетний = 0,829;
двухлетний с учетом цитирования
из всех источников = 1,171;
пятилетний = 0,575

Учредитель и издатель
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «27 Научный центр»
Министерства обороны Российской Федерации
(27 НЦ МО РФ)

Выходит ежеквартально

Главный редактор
д-р техн. наук, доц. Петров С.В. (Москва)

Заместители главного редактора
канд. биол. наук, снс Супотницкий М.В. (Москва)
канд. техн. наук, доц. Колесников Д.П. (Вольск)

Ответственный секретарь
Шило Н.И. (Москва)

Научный редактор
канд. биол. наук Лебединская Е.В. (Москва)

Редакционная коллегия
член-корреспондент РАН, д-р биол. наук, проф.
Аминин Д.Л. (Владивосток)
д-р мед. наук, проф. Дармов И.В. (Киров)
д-р биол. наук, проф. Ефременко Е.Н. (Москва)
д-р биол. наук, проф. Завьялова Н.В. (Москва)
д-р техн. наук, проф. Мухин В.М. (Электросталь)
д-р мед. наук, проф. Рембовский В.Р.
(Санкт-Петербург)
д-р хим. наук Родин И.А. (Москва)
д-р хим. наук, проф. Рыбальченко И.В. (Москва)
д-р хим. наук Савельева Е.И. (Санкт-Петербург)

Редакционный совет
Председатель –
канд. воен. наук Кириллов И.А. (Москва)

Заместители председателя:
канд. экон. наук Кикоть С.Г. (Москва)
канд. хим. наук, доц. Ковтун В.А. (Москва)

Члены редакционного совета:
д-р воен. наук Иноземцев В.А. (Вольск)
д-р техн. наук, проф. Кондратьев В.Б. (Москва)
канд. мед. наук Туманов А.С. (Киров)
д-р хим. наук, проф. Холстов В.И. (Москва)

Дизайн, верстка: Сластилова Л.М. (Москва)

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: 23.12.2022 г. Тираж 500 экз.
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

СОДЕРЖАНИЕ

Редакционная статья

Мир вступил в эпоху синтетического биологического оружия
И.А. Кириллов 303

Проблемы соблюдения конвенций о запрещении химического и биологического оружия

Наночастицы как потенциальные агенты химического и биологического оружия
Ян Лакота (англ.) 304
Современные психоактивные вещества и их обнаружение в биомедицинских пробах
А.М. Григорьев, В.Н. Фатеенков 320

Химическая безопасность и защита от химического терроризма

Новые ферментные мишени для фосфорорганических соединений
Е.Н. Ефременко, А.Г. Асланлы, И.В. Лягин 342

Вооружение и средства войск РХБ защиты

Применение современных технических средств химической разведки и контроля
для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ
В.А. Иноземцев, И.Н. Ефимов, А.А. Позвонков, А.С. Самородов,
В.Н. Пономарев, С.С. Колбинев 355
Опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции
при ликвидации чрезвычайных ситуаций
А.С. Морозов, В.П. Лакомов, А.А. Носков 365

Лекции по ключевым вопросам РХБ безопасности

Анализ состояния развития и применения беспилотных летательных аппаратов,
предназначенных для решения задач РХБ безопасности
К.Н. Аккузин, Е.С. Макеев 372

Повседневная деятельность войск РХБЗ

Научная рота войск радиационной, химической и биологической защиты
Е.А. Чугунов, К.Н. Аккузин, Р.В. Никифоров, И.С. Горохов 386

Хроника

На территории Шиханского гарнизона открыли Парк семьи «Фруктовый сад» 391
К 85-летию доцента Евгении Петровны Поздняковой 392
Старков Евгений Геннадьевич (к 65-летию со дня рождения) 394
Памяти Тимерьяна Габдрахмановича Абдуллина (1926–2022 гг.) 396
Памяти Кочергина Александра Ивановича (02.08.1941 – 16.07.2021 гг.) 398
Указатель авторов и статей журнала за 2022 год 399

Преимуществом в опубликовании пользуются работы по научным специальностям 6.2.1, 6.2.10, 6.3.4 и 6.3.5.
Все рукописи проверяются программой «Антиплагиат»

Журнал включен в научную электронную библиотеку eLIBRARY.RU и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).
Условия оферты для авторов приведены в п. 11 Правил подготовки направления статей в журнал
«Вестник войск РХБ защиты» (Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т. 6. № 1. С. 86–95).

К публикации принимаются статьи на русском и английском языках, подготовленные в соответствии с «Правилами
направления и опубликования научных статей в журнале «Вестник войск РХБ защиты». Статьи проходят
рецензирование не менее чем двумя рецензентами. Используются модели двойного слепого рецензирования либо
открытого рецензирования (по выбору авторов). Плата за публикацию статьи и рецензирование рукописей не
взимается, ускоренная публикация не допускается. Труды заочных конференций не публикуются.

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.



Published since
2017

JOURNAL

OF NBC PROTECTION CORPS

ISSN 2587-5728
(Print)
Vol. 6 No 4
2022

«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.

The impact factor of the journal according to the Russian Science Citation Index for 2021:
two-year = 0.829;
2 years including citations from all sources = 1.171;
five year old = 0.575

Founder and Publisher
Federal State Budgetary Establishment
«27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Quarterly Edition

Editor-in-Chief
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Petrov S.V. (Moscow)

Deputy Editors-in-Chief
Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
Supotnitskiy M.V. (Moscow)
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kolesnikov D.P. (Volsk)

Executive Secretary
Shilo N.I. (Moscow)

Science Editor
Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
Lebedinskaya E.V. (Moscow)

Editorial Board
Corresponding Member of RAS, Doctor of Biological Sciences, Professor Aminin D.L. (Vladivostok)
Doctor of Medical Sciences, Professor Darnov I.V. (Kirov)
Doctor of Biological Sciences, Professor Efremenko E.N. (Moscow)
Doctor of Biological Sciences, Professor Zavyalova N.V. (Moscow)
Doctor of Technical Sciences, Professor Mukhin V.M. (Elektrostal)
Doctor of Medical Sciences, Professor Rembovskiy V.R. (St.-Petersburg)
Doctor of Chemical Sciences Rodin I.A. (Moscow)
Doctor of Chemical Sciences, Professor Rybalchenko I.V. (Moscow)
Doctor of Chemical Sciences Savelieva E.I. (St.-Petersburg)

Editorial Council
Chairman –
Candidate of Military Sciences Kirillov I.A. (Moscow)

Vice-Chairmen:
Candidate of Economical Sciences Kikot S.G. (Moscow)
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor Kovtun V.A. (Moscow)

Editorial Council Members:
Doctor of Military Sciences Inozemcev V.A. (Volsk)
Doctor of Technical Sciences, Professor Kondratyev V.B. (Moscow)
Candidate of Medical Sciences Tumanov A.S. (Kirov)
Doctor of Chemical Sciences, Professor Kholstov V.I. (Moscow)

CRC preparation: Slastilova L.M. (Moscow)

Address of the Editorial Office
Federal State Budgetary Establishment
«27 Scientific Centre» 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.

The publication data for the journal is 23 December, 2022. Circulation: 500 copies.
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

Contents

Editorial

The World Has Entered the Era of Synthetic Biological Weapons

I.A. Kirillov 303

The Problems of Adherence to the Chemical and Biological Weapons Conventions

Nanoparticles as Potential Agents of Chemical and Biological Weapons

Ján Lakota (Eng.) 304

Modern Psychoactive Substances and Their Detection in Biomedical Samples

A.M. Grigoryev, V.N. Fateenkov 320

Chemical Security and Protection against Chemical Threats

New Enzymatic Targets for Organophosphorus Compounds

E.N. Efremenko, A.G. Aslanli, I.V. Lyagin 342

Weapons and Means of NBC Protection Troops

Application of Modern Technical Means of Chemical Reconnaissance and Control for the Detection and Identification of Explosives

V.A. Inozemcev, I.N. Efimov, A.A. Pozvonkov, A.S. Samorodov,
V.N. Ponomarev, S.S. Kolbincev 355

Use of Modular and Wearable Technical Means of Disinfection During Liquidation of Emergency Situations

A.S. Morozov, V.P. Lakomov, A.A. Noskov 365

NBC Protection Troops Everyday Life

Scientific Company of the NBC Protection Troops

E.A. Chugunov, K.N. Akkuzin, R.V. Nikiforov, I.S. Gorokhov 386

Key Issues of NBC Security. Lectures

Analysis of the Development and Use of Unmanned Aerial Vehicles Designed for NBC Protection Purposes

K.N. Akkuzin, E.S. Makeev 372

Cronicle

Family Park «Orchard» Was Opened on the Territory of the Shikhany Garrison 391

Associate Professor Evgenia Petrovna Pozdnyakova (85th Birth Anniversary) 392

Evgeny Gennadiyevich Starkov (65th Birth Anniversary) 394

In Memoriam Timeyan Gabdrahmanovich Abdullin (1926–2022) 396

In Memoriam Alexander Ivanovich Kochergin (02.08.1941 – 16.07.2021) 398

2022 Index 399

Papers in scientific specialties 6.2.1, 6.2.10, 6.3.4 and 6.3.5 enjoy the advantage in publication.

All manuscripts are checked by the Anti-Plagiarism program.

The journal is included into the scientific electronic library eLIBRARY.RU and the Russian Science Citation Index.

Terms of the offer for the authors are given in the Article 11 of the Rules for the authors (Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6, No 1. P. 86–95).

Only articles prepared in Russian and English languages and in accordance with the Rules for the Authors of Sending and Publishing of the Articles in the «Journal of NBC Protection Corps», are acceptable for the publication. All research articles are peer reviewed by at least two suitably qualified experts. Double-blind peer review and open peer review are both available by the authors' choice. The journal does not charge article-processing, publication and peer review fees. Accelerated publication is not allowed. The papers from correspondence conferences are not published.

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.

Мир вступил в эпоху синтетического биологического оружия



Уходящий 2022 г. показал слом устоявшихся представлений о биологическом оружии и существующих подходов к контролю над его распространением. Благодаря тому, что с 1999 г. Министерство здравоохранения и социальных служб США (HHS) финансировало исследования по изучению механизмов приобретения возбудителями инфекционных болезней новых патогенных свойств, современная биологическая война уже не ведется в традициях Второй мировой войны, заложенных японскими военными изуверами отряда 731. Бомбы, крылатые ракеты в снаряжении биологическими рецептурами оказались задвинутыми на второй план синтетическими патогенами с «усиленными функциями» (англ. Gain-of-function), т.е. с увеличившейся способностью заражать людей и наносить им вред. Как результат, начавшаяся в конце 2019 г. пандемия COVID-19 привела к гибели только в России 393 331 человека (официальные данные на 23.12.2022).

Благодаря технологии, получившей название «обратная генетика» и сборке генома вируса из синтетических фрагментов ДНК, стало возможным их конструирование без выделения из окружающей среды. Уже восстановлены древние ретровирусы, сходные с теми, что вызывают ВИЧ-инфекцию; «оживлены» вирус гриппа, вызвавший в 1918 г. пандемию «испанки», и вирус оспы лошадей, считавшийся вымершим в прошлом веке. Как-то буднично собраны в дрожжах из крупных фрагментов синтетической ДНК вирусы ZIKA, Эбола, респираторно-синцитиальный вирус человека, SARS-CoV-1 и SARS-CoV-2.

Уже ни для кого не секрет, что современные технологии синтетической биологии и математического моделирования эпидемий позволяют сконструировать такой вариант опасного патогена, который при «столкновении» с наиболее вероятным иммунным ответом человека будет эволюционировать в сторону большей контагиозности и способности преодолевать иммунитет, сформировавшийся в результате уже перенесенной болезни или вакцинации.

Именно это мы видели в 2020–2022 гг. на примере появления новых вариантов SARS-CoV-2.

Недавно идентифицированный вариант SARS-CoV-2 Omicron (BA.1), обладающий высокой трансмиссивностью даже у полностью вакцинированных лиц и вызывающий легко протекающее заболевание, тут же специалистами Бостонского университета в инициативном порядке зачем-то был «переделан» в вариант, вызывающий тяжелое заболевание с летальностью 80%. «На подходе» и синтетический вирус натуральной оспы – его нуклеотидная последовательность известна. Неизвестно только, кто проявит инициативу и в этом случае. При этом за 20 лет в США, начавших новую военно-биологическую гонку, не было создано ни вакцин, ни схем лечения поражений, вызываемых синтетическими патогенами.

В ходе пандемии COVID-19 установлена зависимость тяжести течения инфекционной болезни от генов, определяющих факторы иммунного ответа хозяина на вирус, в то время как разная восприимчивость людей к SARS-CoV-2 связана с вариантами генов, кодирующих поверхностные рецепторы и имеющих отношение к начальной стадии инфекции. Изучение распределения в популяции вариантов этих генов позволяет предсказать вероятность развития эпидемии, ее масштаб, тяжесть течения болезни у индивидуумов, вероятную убыль населения и экономические потери. Эти исследования также открывают широкие возможности для поднастройки патогенов под конкретный генотип человека.

Ситуация с применением синтетической биологии для конструирования патогенов Gain-of-function и их последующего распространения уже стала неуправляемой. Остановить прогресс в этой области также невозможно. Необходимо срочно возобновить работу над протоколом к Конвенции 1972 г. о запрещении биологического оружия, учитывающим новые реалии в разработке поражающих биологических агентов и способов ведения биологической войны.

*Начальник войск радиационной, химической и биологической защиты
Вооруженных Сил Российской Федерации,
генерал-лейтенант*

И.А. Кириллов

Nanoparticles as Potential Agents of Chemical and Biological Weapons

© АВТОР, 2022
УДК 606; 601.4; 608.3
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-304-319>
<https://elibrary.ru/cgefod>



Ján Lakota

Centre of Experimental Medicine, SAS, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava,
Slovakia Faculty of Management Comenius University, Odbojárov 10,
820 05 Bratislava, Slovakia

Received 25 October 2022. Accepted 23 December 2022

The wide distribution in industry, medicine, agriculture, and other areas of human activity of nanoscale objects raise the question of the possibility of their dual use, which in this work means the use for deliberate mass destruction of people. The *aim of the work* is to consider nanoparticles as potential agents of chemical and biological weapons. Nanoparticles of any type have been shown to have biological activity. This is due to an increase in the surface activity of particles during the transition from microscale to nanoscale and their ability to penetrate the cell, especially cell nucleus. Being non-biological objects, interacting with cell receptors, distorting intracellular signaling pathways and affecting the genetic regulation of the cell, they can cause a variety of pathological effects (oxidative stress, neuroinflammation, neurodegeneration, etc.). Therefore, with the transition from microscales to nanoscales, essentially remaining chemical compounds, particles of non-toxic materials can transform into potential biological and chemical damaging agents. The existing possibilities of their mass use through the respiratory system, skin, gastrointestinal tract and through the introduction of injectable forms of drugs suggest that based on damaging agents of this type, weapons of mass destruction of a new type that are not subject to the Conventions on the Prohibition of Chemical and Biological Weapons can be developed. It is necessary to start developing methods for detecting nanoparticles and other nanoobjects in various environments surrounding a person, food and dosage forms

Keywords: *genotoxic effects; intracellular signaling pathways; nanomaterials; nanoparticles; nanotechnology; NP toxicity; oxidative stress; weapon of mass destruction.*

For citation: *Lakota Ján. Nanoparticles as Potential Agents of Chemical and Biological Weapons // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6. № 4. P. 304–319. EDN: CGEFOD. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-304-319>*

Introduction

On December 26th, 1959, Richard Feynman gave a classic talk at the annual meeting of the American Physical society at California Institute of Technology entitled «There's Plenty of Room at the Bottom». This is generally considered to be a seminal event in the history of nanotechnology. In particular, he said: «...When we get to the very, very small world - say circuits of seven atoms - we have a lot of new things that would happen that represent completely new opportunities for design. Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. So, as we go down and fiddle around with the atoms

down there, we are working with different laws, and we can expect to do different things.»¹

The *aim of the work* is to consider nanoparticles as potential agents of chemical and biological weapons.

Main

For an introduction to the problematic, we will use the information which is freely available on internet². According to IUPAC proposed terminology for biologically related polymers, the IUPAC defined a nanoparticle as «a particle of any shape with dimensions in the 1×10^{-9} and 1×10^{-7} m range» [1]. In general, the unique properties of nanomaterials are attributed to quantum effects,

¹ <https://calteches.library.caltech.edu/1976/> (date: 31.12.2021).

² <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoparticle> (date: 25.18.2022).

larger surface area, and self-assembly. Quantum effects can begin to dominate the behavior of matter at the nanoscale – particularly at the lower end – affecting the optical, electrical, and magnetic behavior of materials. This is attributed to the fact that matter at nanoscale no longer follows laws of classical physics. It rather follows the laws of quantum mechanics, which can be explained by size effect, quantum confinement and density of states (DOS). Secondly, nanomaterials have a larger surface area when compared to the same mass of material produced in bulk form. The smaller the particle size, the more the proportion of surface atoms, leading to an increased reactivity due to rise in number of the active sites. In some cases, inert materials in their bulk form turn out to be reactive when produced in their nanoscale form. Effect of larger surface area applies to all nanomaterials in different shapes, whether nanocoatings, nanowires, nanotubes, or nanoparticles. Thirdly, self-assembly is a process that rests on the organization of components producing an ordered pattern or structure. At nanoscale it reflects the information encoded in individual molecules such as shape, charge, polarizability, and so on that determine their attractive or repulsive interactions. Molecular self-assembly usually takes advantage of supramolecular interactions (ionic, hydrophobic, van der Waals, hydrogen, and coordination bonds), but can also make use of kinetically labile covalent bonds. This intrinsic mobility leads to ordered nanostructures upon equilibration between aggregated and nonaggregated states, thus providing several interesting properties such as error correction, self-healing, and high sensitivity to external stimuli [2]. By Gleiter's definition the size effects in microstructures arise when its size d is reduced up to a critical value when scale length of physical phenomenon (free path length of electrons, phonons, etc.; coherent length, screening length, etc.) becomes to be equal to or compatible with characteristic size (length, thickness, diameter) of building blocks of microstructures. Basically, the properties of a material are characterized by a specific «length scale», usually on the nanometer dimension. If the physical size of the material is reduced below this length scale, its properties change and become sensitive to size and shape. Size effects constitute a peculiar and fascinating aspect of nanomaterials. The effects determined by size pertain to the evolution of structural, thermodynamic, electronic, spectroscopic, electromagnetic, and chemical features of these finite systems with changing size, which are different from the bulk and their isolated atoms/molecules. Classical laws of physics fail to explain the origin of the novel properties of materials in this size regime. Moreover, nanocrystals possess a high surface area and a large fraction of the atoms

in a nanocrystal are on its surface, which in turn depends on the size of the particle (30% for a 1-nm crystal, 15% for a 10-nm crystal) [3]. Size effects constitute a peculiar and fascinating aspect of nanomaterials. Nanomaterials are closer in size to single atoms and molecules than to bulk materials, and to explain their behavior it is necessary to use quantum mechanics. Basically, quantum mechanics is a scientific model that was developed for describing the motion and energy of atoms and electrons. The most salient quantum effects together with other physical properties arising at nanoscale are as follows:

Due to the smallness of nanomaterials, their mass is extremely small and gravitational forces become negligible. Instead, electromagnetic forces are dominant in determining the behavior of atoms and molecules.

Wave-corpuscle duality of matter: For objects of very small mass, such as the electrons and nucleons, wave-like nature has a more pronounced effect. Thus, electrons and nucleons exhibit wave behavior, and their position is represented by a wave (probability) function.

One of the consequences is a phenomenon called «tunneling». Classical physics states that a body can pass a barrier (potential barrier) only if it has enough energy to «jump» over it. Therefore, if the object has lower energy than that needed to jump over the energy barrier (the «obstacle»), in classical physics, the probability of finding the object on other side of the barrier is zero. On the other hand, in quantum physics a particle with energy less than that required to jump the barrier has a finite probability of being found on the other side of the barrier mainly due to the tunneling effect (Figure 1). It should be noted that tunneling is the penetration of an electron (or a nucleon) into an energy region that is classically forbidden i.e., «it does not work». To have tunnel effect, the thickness of the barrier (i.e., energy potential) must be comparable to the wavelength of the particle; in other words, electron (or quantum) tunneling is attained when a particle (an electron) with lower kinetic energy is able to exist on the other side of an energy barrier with higher potential energy, thus defying a fundamental law of classical physics [4]. Therefore, this effect can be observed only at a nanometer level.

An interesting feature of quantum mechanics laws which «govern» in the nanoworld is the observation of magnetism in non-magnetic nanoparticles. Enhanced magnetism in clusters of elements that are ferromagnetic as bulk solids such as iron, cobalt, or nickel is well known and has been demonstrated in Stern–Gerlach deflection experiments. Theoretical studies predicted high spin ground states for clusters of up to 13 atoms even in nonmagnetic elements such as Pd and Pt.

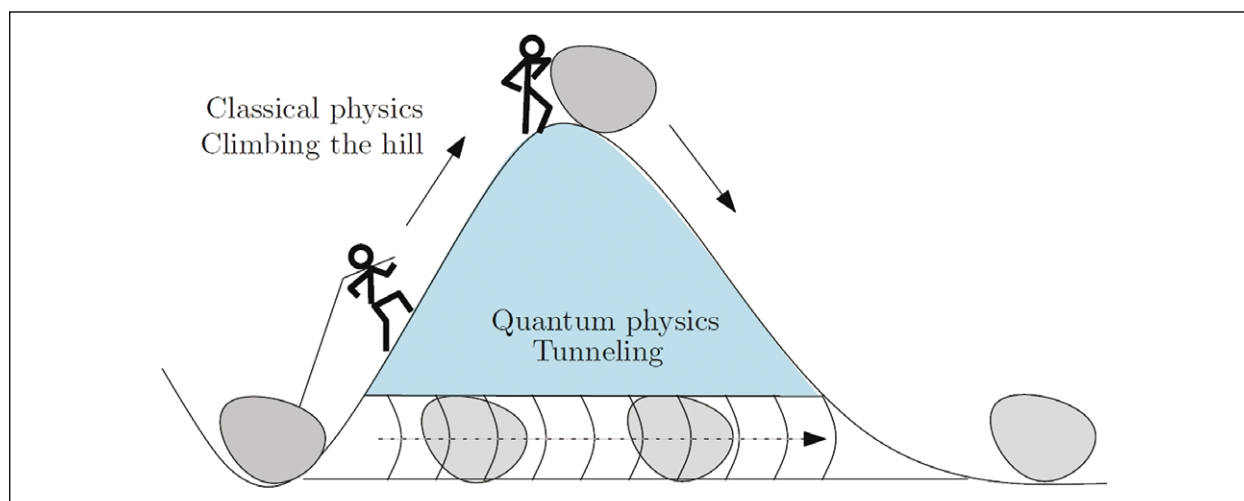


Figure 1 – Quantum tunneling. Quantum tunneling is the effect when a quantum mechanical particle faces an energy barrier but after the energy barrier there is an energy downhill, and it has a probability of «passing through» the energy hill. (<https://i.stack.imgur.com/VuqhM.png>; date: 11.09.2022)

Nanoparticles comprising several hundred atoms of Au, Pd, and Pt embedded in a polymer reveals magnetic moments corresponding to several unpaired electron spins per entire particle [5].

Chemical properties of nanomaterials also change at nanoscale. As the percentage of surface atoms in nanoparticles is large compared with bulk objects, the reactivities of nanomaterials are more than bulk materials [6]. The following are some of the reasons responsible for the change in chemical properties at nanoscale:

The preponderance of surface is a major reason for the change in behavior of materials at the nanoscale. As up to half of all the atoms in nanoparticles are surface atoms, properties such as electrical transport are no longer determined by solid-state bulk phenomenon.

The atoms in nanomaterials have a higher average energy than atoms in their bulk counterparts because of the larger proportion of surface atoms. For example, catalytic materials have a greater chemical activity per atom of exposed surface as the catalyst is reduced in size at the nanoscale.

Defects and impurities may be attracted to surfaces and interfaces, and interactions between particles at those small dimensions can depend on the structure and nature of chemical bonding at the surface.

Molecular monolayer may be used to change or control surface properties and to mediate the interaction between nanoparticles.

For an illustration we show change in surface area on the reduction of size (Table 1).

Types of nano materials: Nanoparticles (NPs) are broadly divided into various categories depending on their morphology, size, and chemical properties³.

Classification based on dimension:

Zero Dimensional Nanomaterials. Zero-dimensional (0-D) structures include materials with all dimensions at nanoscales of 1 to 100 nm. Most of these materials are spherical in shape; however, cubes and polygonal shapes with nanodimensions are also found under this class.

One Dimensional Nanomaterials. One-dimensional (1-D) structures are materials with two dimensions at the nanoscale and the other

Table 1 – Change in Surface Area on Size Reduction*

| Size of the cube side | Number of cubes | Collective surface area |
|---------------------------|------------------|--|
| 1 m | 1 | 6 m ² |
| 0.1 m | 10 ³ | 60 m ² |
| 0.01 m | 10 ⁶ | 600 m ² |
| 0,001 m (1 mm) | 10 ⁹ | 6000 m ² |
| 10 ⁻⁹ m (1 nm) | 10 ²⁷ | 6 × 10 ⁹ m ² (6000 km ²) |

*https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_nanoscience (date: 11.09.2022)

³ Nanomaterials: Types & Examples. <https://studiousguy.com/nanomaterials-types-examples/> (date: 11.09.2022).

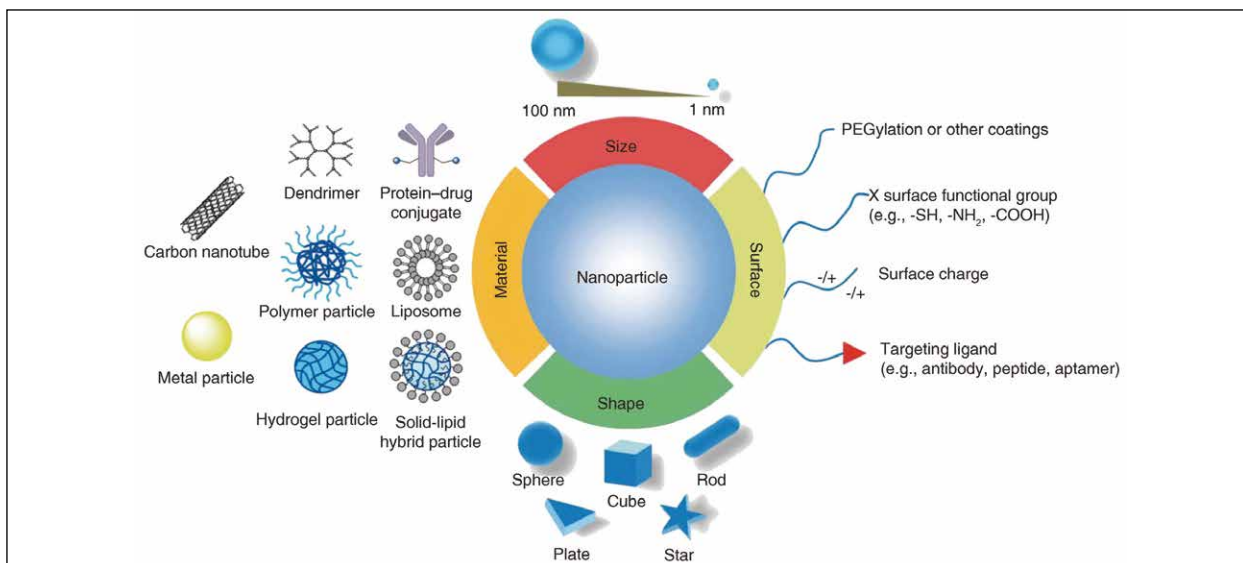


Figure 2 – Examples of some nanoparticles with different chemical composition. (<https://www.futuremedicine.com/cms/10.2217/nnm-2020-0132/asset/images/large/figure2.jpeg>; date: 11.09.2022)

dimension is beyond the nanoscale (>100 nm), meaning that one dimension is outside the nanoscale.

Two Dimensional Nanomaterials. Two-dimensional (2-D) structures are materials with one dimension at the nanoscale, and two of the dimensions are not confined to the nanoscale. 2-D nanomaterials exhibit platelike shapes.

Three Dimensional Nanomaterials. Three-dimensional (3-D) structures are materials having three arbitrary dimensions beyond the nanoscale (>100 nm). However, these materials possess a nanocrystalline structure or involve the presence of peculiarities at the nanoscale. They can be composed of multiple arrangements of nanosize crystals, most typically in different orientations.

Classification based on Chemical Composition (Figure 2):

Organic Nanomaterials. As the name suggests, organic nanomaterials are the class of carbon-based nanomaterials whose covalent interactions make them compatible for biomedical purposes. In recent years, a significant increase in the studies focused on the uses of nanomaterials with the organic structure for regeneration of bone, cartilage, skin, or dental tissues. There is numerous evidence for several advantages of using natural or synthetic organic nanostructures in a wide variety of dental fields, from implantology, endodontics, and periodontics, to regenerative dentistry and wound healing. Biomedicine stands to profit from the use of organic nanocarriers. Some of the advantages of the nanostructures include higher colloidal stability, improved dispersibility, and improved surface reactivity. The most prominent characteristic of organic nanomaterials continues to be their ability to control the delivery of drugs

such as small molecule drugs, proteins, and DNA; however, there are several other potential applications of organic nanomaterials, such as polymers for coatings, nanoscale optoelectronics, and other technical applications.

Inorganic Nanomaterials. Inorganic nanomaterials are the class of nanomaterials primarily composed of metal-based nanomaterials, metal-oxide-based nanomaterials, ceramics, a few non-metals-based nanomaterials, and other nanostructured materials whose central core is composed of inorganic materials that define their fluorescent, magnetic, electrical, and optical properties. Numerous studies have shown that inorganic nanomaterials including gold nanoparticles, nonporous and mesoporous silica nanoparticles, magnetic nanoparticles, and quantum dots have shown great potential in bioimaging, targeted drug delivery, cancer therapies, and other technological sectors, such as biosensing, chemical sensing, electronics, and optical applications.

Hybrid Nanomaterials. Hybrid nanomaterials are defined as unique chemical conjugates of organic and/or inorganic materials, i.e., these are mixtures of two or more inorganic components, two or more organic components, or at least one of both types of components. The resulting material is not a simple mixture of its components but a synergistic material with properties and performance to develop applications with unique properties determined by the interface of the components at the molecular or supramolecular level. Its functionality is associated with the improvement of physicochemical properties. For the electrochemical or biochemical properties through the optimization mainly of magnetic,

electronic, optical, and thermal properties or a combination of them (see Figure 2).

We present some examples of nanoparticles in more detail [7].

Carbon-based NPs. Fullerenes and carbon nanotubes (CNTs) represent two major classes of carbon-based NPs. Fullerenes contain nanomaterial that are made of globular hollow cage such as allotropic forms of carbon. They have created noteworthy commercial interest also in nanocomposites for many commercial applications such as fillers, efficient gas adsorbents for environmental remediation, and as support medium for different inorganic and organic catalysts. CNTs serve as target-specific delivery of drugs and therapeutic agents to the site of action - delivery of vaccines, genetic material, proteins. It should be noted that at least two types of aqueous dispersible graphene, corresponding to single-layer (SLG) and few-layer graphene (FLG), are biodegraded by human myeloperoxidase (hMPO) mediated catalysis. Graphene can be degraded either by recombinant hMPO or by hMPO secreted by activated neutrophils [8].

Metal NPs. Metal NPs are purely made of the metal's precursors. Due to well-known localized surface plasmon resonance (LSPR) characteristics, these NPs possess unique optoelectrical properties. NPs of the alkali and noble metals i.e., Cu, Ag and Au have a broad absorption band in the visible zone of the electromagnetic solar spectrum. The facet, size and shape-controlled synthesis of metal NPs is important in present day cutting-edge materials. Due to their advanced optical properties, metal NPs find applications in many research areas. Gold NPs coating is widely used for the sampling of SEM, to enhance the electronic stream, which helps in obtaining high quality SEM images. There

are many other applications, which are deeply discussed in applications section of this review [8].

Ceramics NPs. Ceramics NPs are inorganic nonmetallic solids, synthesized via heat and successive cooling. They can be found in amorphous, polycrystalline, dense, porous, or hollow forms. These NPs are getting great attention of researchers due to their use in applications such as catalysis, photocatalysis, photodegradation of dyes, and imaging applications.

Semiconductor NPs. Semiconductor materials possess properties between metals and nonmetals. Semiconductor NPs possess wide bandgaps and therefore showed significant alteration in their properties with bandgap tuning⁴. Therefore, they are very important materials in photocatalysis, photo optics and electronic devices. As an example, variety of semiconductor NPs are found exceptionally efficient in water splitting applications, due to their suitable bandgap and band edge positions.

Polymeric NPs. These are normally organic based NPs, and, in the literature, a special term «polymer nanoparticle (PNP)» is used. They are mostly nanospheres or nano capsular shaped. The former are matrix particles whose overall mass is generally solid, and the other molecules are adsorbed at the outer boundary of the spherical surface. In the latter case the solid mass is encapsulated within the particle completely. The PNPs are readily functionalize and thus find bundles of applications.

Lipid-based NPs. These NPs contain lipid moieties and effectively using in many biomedical applications. Generally, a lipid NP is characteristically spherical with diameter ranging from 10 to 1000 nm. Like polymeric NPs, lipid NPs possess a solid core made of lipid and a matrix contains soluble lipophilic molecules. Surfactants

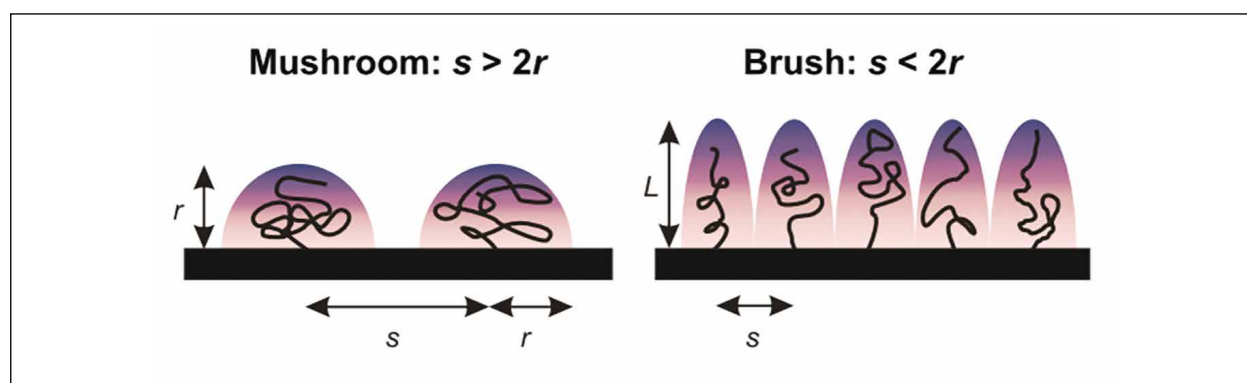


Figure 3 – Mushrooms versus Polymer Brushes: a sketch illustrating how surface-tethered polymer chains can take on either «mushroom» - like or «brush» - like molecular conformations, depending on how closely packed the polymer chains are. The mushroom regime occurs when the distance between neighboring chains s , is greater than twice the radius of the polymer. The brush regime is encountered when $s < 2r$ and the polymer chains are extended away from the surface at a height of L [9]

⁴ Band gap. https://en.wikipedia.org/wiki/Band_gap (date: 10.07.2022).

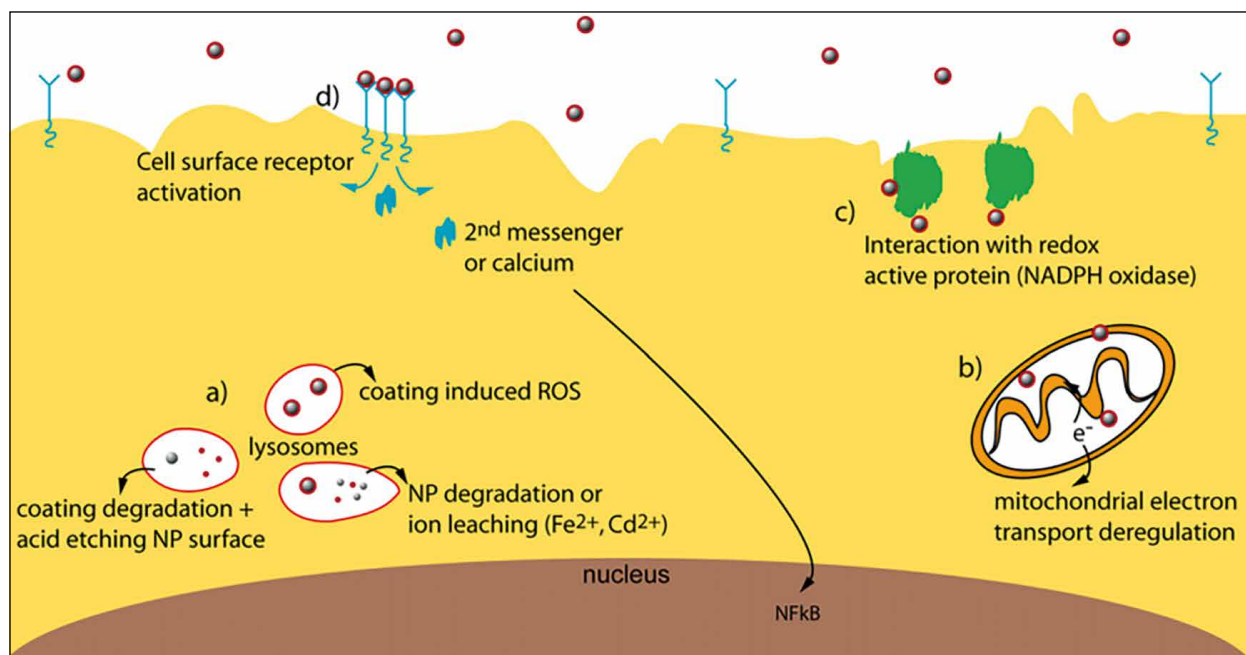


Figure 4 – Schematic overview of the different pathways by which NPs can induce oxidative stress. (a) NPs present in the acidic environment of lysosomes can induce ROS by direct reactivity of their surface coating, degradation of the coating and direct interaction of the acidic media on the metal surface or degradation of the whole nanoparticle and production of ions (Fe^{2+} , Cd^{2+}) which can induce ROS species by various chemical reactions. (b) Nanomaterial can also directly interact with oxidative organelles such as the mitochondria by destabilizing the outer membrane, deregulating the mitochondrial membrane potential and hereby disrupting the electron transport chain of the oxidative phosphorylation. (c) Nanoparticles can directly interact with redox active proteins such as NADPH oxidase and hereby stimulate large ROS production in cells of the immune system. (d) Interaction of nanoparticles with surface located receptors can lead to receptor activation and triggering of intracellular signaling cascades (activation of second messenger or calcium waves), finally resulting in expression of stress response genes which can upregulate ROS [11]

or emulsifiers stabilized the external core of these NPs. Lipid nanotechnology is a special field, which focus the designing and synthesis of lipid NPs for various applications such as drug carriers and delivery and RNA release in cancer therapy.

The molecular chain between the surface binding and functional group not only determines the thickness of the surface layer, but also contributes to its stability. One of the most common spacers, widely used in the design of biologically compatible and stable NPs and nanomaterials is polyethylene glycol (PEG) and the process of PEG addition to nanomaterial is known as PEGylation. PEG has proven to be exceptionally good for stabilization of nanomaterials in biological fluids, preventing their agglomeration and increasing hydrophilicity of the whole system. PEGylation is used to increase the circulation time and the probability of reaching the biological target and to reduce the uptake by the reticuloendothelial system. PEG increases the «stealth» of the nanomaterials by preventing the binding of the opsonin proteins (opsonization). If the binding of opsonins to NPs is prevented, macrophages do not perceive them as biological garbage or dangerous species and they are able to

circulate in the blood until they reach the target. The behavior of the surface (PEG) layer strongly depends on the density of the individual PEG linkers (Figure 3).

NPs with brush conformation generally have longer circulation time in human blood, since dense packing prevents the protein adsorption. PEG is not biodegradable, thereby it can accumulate in the cells. Furthermore, it can be degraded into smaller fragments under the influence of light, heat or shear stress. The resulting degradation products might affect the properties of nanomaterials and cause tissue damage.

It is increasingly recognized that treating patients with PEGylated drugs can lead to the formation of antibodies that specifically recognize and bind to PEG (i.e., anti-PEG antibodies). Anti-PEG antibodies are also found in patients who have never been treated with PEGylated drugs but have consumed products containing PEG. Consequently, treating patients who have acquired anti-PEG antibodies with PEGylated drugs results in accelerated blood clearance, low drug efficacy, hypersensitivity, and, in some cases, life-threatening side effects [10].

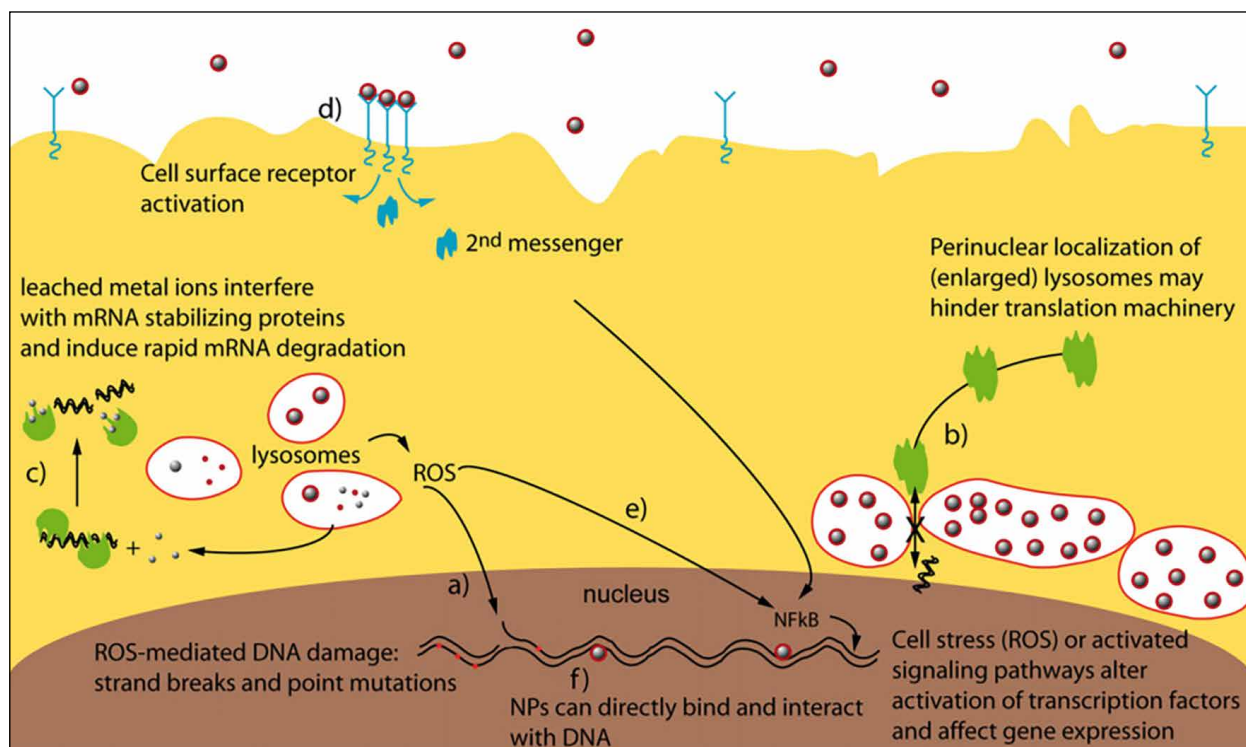


Figure 5 – Schematic overview of the different mechanisms by which NPs can induce genotoxic effects or affect intracellular signaling pathways. (a) High levels of induced ROS by NPs localized in lysosomes can directly induce DNA point mutations or lead to single or double strand breaks. (b) The proximal perinuclear localization of large numbers of NP-loaded lysosomes can hinder the cellular transcription and translation machinery and hereby affect global protein synthesis. (c) Leached metal ions from lysosomal located NPs can transfer to the cell cytoplasm via specialized complexes (e.g. divalent metal transporter) where it can then interact with mRNA stabilizing proteins which contain metal responsive domains; resulting in the release and degradation of the mRNA (e.g. mRNA of transferrin receptor in response to ferric ions). (d) Interaction of nanoparticles with surface located receptors can lead to receptor activation and triggering of intracellular signaling cascades (activation of second messenger or calcium waves). (e) NP-mediated ROS induction and associated protein and lipid peroxidation can also indirectly affect gene expression patterns by activation of stress response or repair genes. (f) Nanosized particles (such as Au NPs) can penetrate the nucleus and bond to and interact with DNA directly [11]

Tests. The increasing frequency of resulting cell—NP interactions necessitates a more profound knowledge of nanoparticle effects on cells. To date, this question is far from answered, as many ambiguous findings have been reported in the literature, mostly based on experiments with cultured cells [11]. The assessment of NP toxicity has been complicated due to a great variety in:

- (1) types of used NPs,
- (2) stabilizing NPs coating agents,
- (3) physicochemical parameters of the NPs (diameter, surface charge, surface topography, surface area),
- (4) incubation conditions (time and concentration),
- (5) type of cells used,
- (6) type of assay used,
- (7) possible interference of the NPs with the assay readout.

As one can see, a direct comparison of results between different studies is practically impossible.

As such, the safety of NPs for biomedical applications and their exposure to (cultured!) cells remains unclear.

Common mechanisms of cytotoxicity NPs are shown in Figure 4 and 5. They include oxidative stress (Figure 4) or genotoxic effects and effects on intracellular signaling pathways (Figure 5).

When evaluating the NP toxicity, one needs to take so called «key parameters» which are necessary to receive comprehensive results (Figure 6).

A schematic overview of a possible workflow in the design of cellular NP toxicity studies is shown in Figure 7.

Toxicity of NPs. By reducing a particle size below about 100 nm, the physicochemical characteristics of the particle will change so that their application will improve in many aspects, such as: electromagnetic, catalytic, thermal stability, flexibility, conductivity, and pharmacokinetic and targeting properties. Biological effects related to nanoparticles exposure also differ from that of

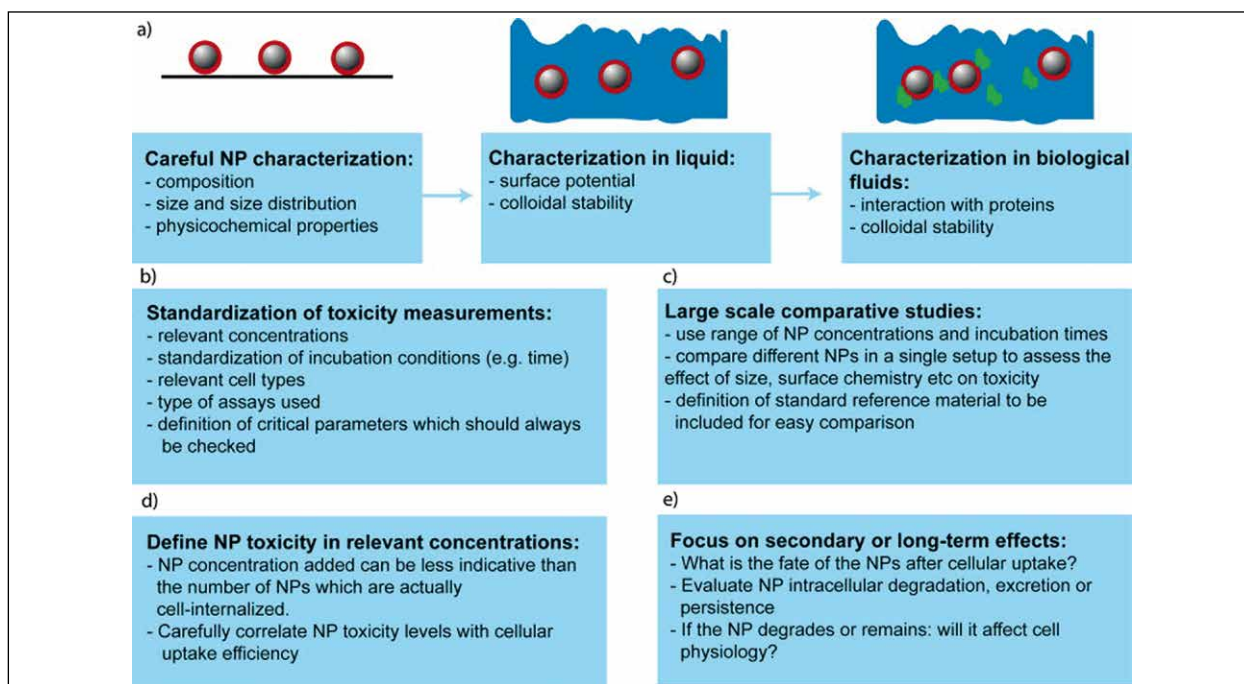


Figure 6 – Schematic overview of the key parameters involved in evaluating NP toxicity: (a) NP characterization in dry state (left), in liquid (middle) and in biological fluids (right). (b) standardization of toxicity measurements, (c) use of large-scale comparative studies, (d) defining NP toxicity in function of relevant concentration and (e) focus on secondary and long-term effects [11]

larger particles. When bulk materials degrade to smaller pieces, their surface chemistry changes, and consequently, their chemical reactivity increases. That is why some nanomaterials are very reactive or catalytically active. Additionally, nanomaterials can pass easily into cells and affect cellular function. Basically, there are two factors which show the potential effects of harmful particles: their large surface area and the reactivity or intrinsic toxicity of the surface. Due to the larger surface area of the small particles per unit mass, the intrinsic toxicity of the particle surface increase. Intriguingly, the complexity of nanomaterial interaction mechanisms with living organisms might come from their different behaviors in contact with biological systems. Therefore, unlike toxicology, nanomaterial properties such as morphology, size, surface charge, coating, agglomeration state, and so on are crucial in nanotoxicology. It should be noted that knowledge is still scant about the human health effects of these materials.

Immune System. In implementing the nanosafety regulations, immuno-nanosafety is crucial. Different physicochemical properties of nanomaterials beside the surface absorption of biomolecules affect their interaction with this system [12–15]. Nanoparticles might be covered by environmental molecules such as allergens or bacterial lipopolysaccharide (LPS), thus triggering the immune responses [16–18]. Severe activation of the complement system by bloodstream

nanoparticles might result in hypersensitivity and anaphylaxis [19]. The nanoparticle-induced inflammation might disappear after their degradation by polymorphonuclear leukocytes (PMNs) of the immune system while LPS contamination of nanomaterials can fall into an inflammatory response [17, 20]. Regardless of the detrimental effects of nanoparticle-induced inflammation, activation of «cytoplasmic multiprotein complex» (NLRP3), considering the accessibility of the cytoplasm by nanomaterials, is a key to triumphant immunization by nanoparticle vaccine adjuvants [21]. However, this «triumphant immunization» can have disastrous consequences for humans. In a recent paper «SARS-CoV-2 drives NLRP3 inflammasome activation in human microglia through spike protein» the infection with COVID-19 and nanoparticle mRNA vaccination against the virus triggers the microglial innate immune activation with profound neurological consequences for the patient [22]. Contradictory results of nanomaterial impacts on the acquired immunity usually come from differences in the sizes of studied nanoparticles along with different specificities of animal models [23–25]. Finally, due to the susceptibility of high-risk groups, exploiting the deleterious effects of nanoparticles on the immune systems of immunocompromised, pregnant women, elderly, and the very young populations is mandatory.

Respiratory System. The respiratory system is one of the main entry routes of NPs [26]. The

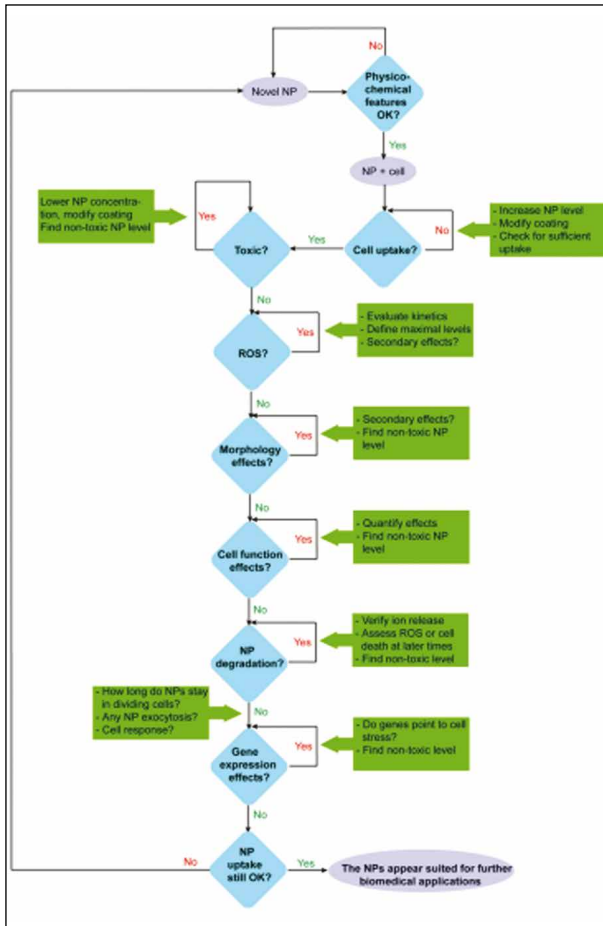


Figure 7 – Schematic overview of a possible workflow in the design of optimized cellular NP toxicity studies. Please see the main text for more details [11]

possibility of inhalation of NPs can occur during their production or consumption or they even may be

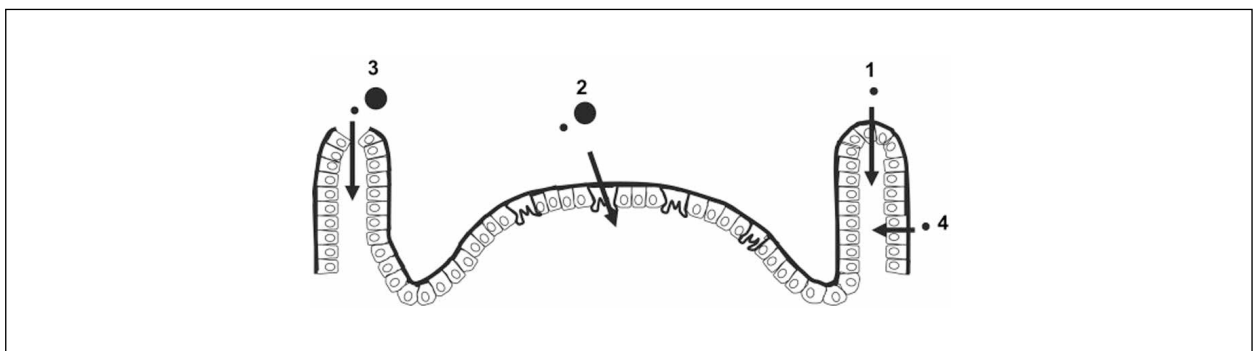


Figure 8 – Summary of particles translocation across the gastrointestinal tract 1. Endocytosis through ‘regular’ epithelial cells. Very small particles tentatively generally <50–100 nm in diameter. 2. M-cell-uptake (transcytosis) at the surface of intestinal lymphoid aggregates. This is the quintessential pathway for gut particle uptake and is very well described, especially for small nanoparticles (20–100 nm) and large microparticles (100–500 nm). 3. Persorption. Volkheimer’s concept of passage through «gaps» at the villous tip following loss of enterocyte(s) to the gut lumen. Small and large nanoparticles potentially access this route, but, quantitatively, it is unlikely to be efficient. 4. Putative paracellular uptake. Generally junctional complexes are unlikely to allow even the smallest of nanoparticles to permeate but certain drugs and/or dietary situations, and especially diseases, may alter this situation allowing influx of]very small nanoparticles. (Taken and corrected from [35])

present as soot particles or air pollutants. Deposition of NPs in the airways and alveoli is largely based on the size of nanoparticles and is predictable according to a mathematical model [27]. Once deposited in the lungs, the nanoparticles have different destinations; they may encounter cellular uptake or clearance, or they may even persist there and form granulomas. In the respiratory tree, cellular uptake of nanomaterials from the epithelial surface occurs through endocytosis, providing nanoparticles a direct entry into the blood and lymph and thereby allowing them to translocate to other parts of the body. In addition, olfactory epithelium can translocate some metal nanomaterials such as manganese, cadmium, nickel, and cobalt to the brain via olfactory nerves [28].

The mucociliary escalator and phagocytosis by macrophages are the two main clearance pathways of NPs. Different physicochemical properties of NPs such as size, agglomeration state, surface charge, and coating can affect their clearance, distribution in the respiratory system, and translocation to other systems [29]. For example, administration of large multiple walled carbon nanotubes (CNT) to rats by transtracheal intrapulmonary spraying can result in their translocation into the pleural cavity, thus inducing pleural lesions, whereas small multiple walled CNT just cause harm to the lung tissue itself [30, 31]. Most of our knowledge of the pulmonary effects of NPs on human health comes from the workers of nanomaterial factories as well as human cell in vitro studies. In these studies, depending on type and exposure of NPs, the following effects were seen reduced lung function, pro-inflammatory cytokines secretion, elevated oxidative stress markers, small airway injury, deposition of extracellular matrix proteins, and reduced antioxidant enzymes, for example,

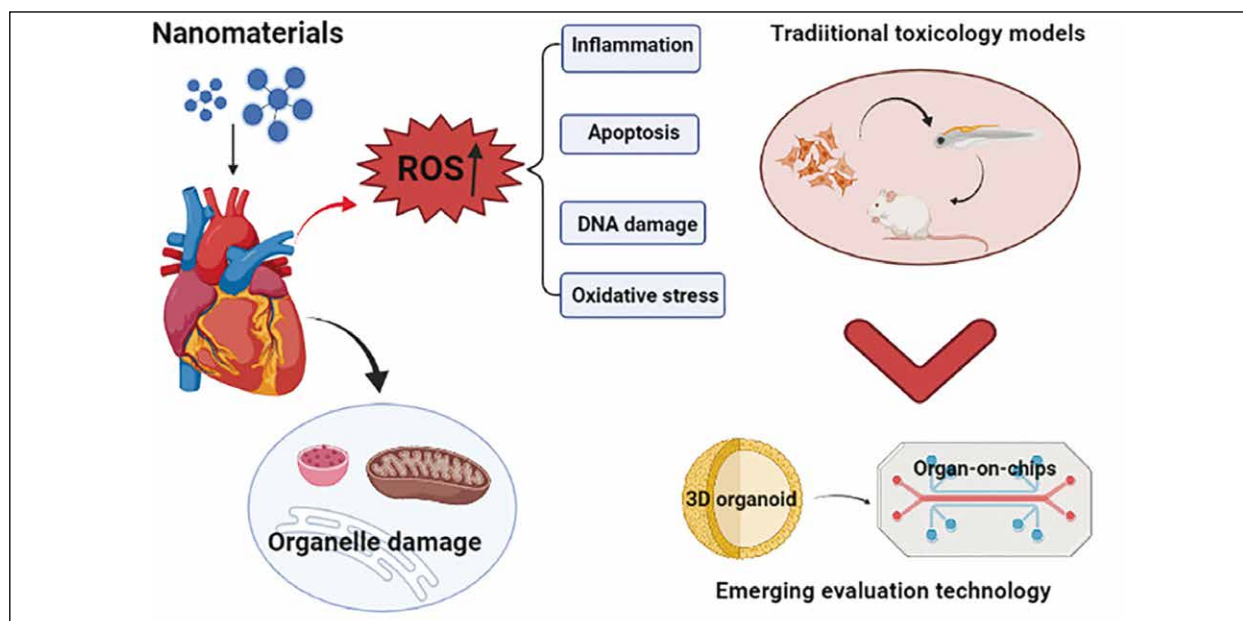


Figure 9 – Schematic representation of cardiac toxicity and the principles of the toxicity assays. The figure is taken from [53]

superoxide dismutase and glutathione peroxidase. Other potential toxic effects of NPs include activation of the immune system and induction of asthma, granuloma formation, fibrosis, genotoxicity, and carcinogenic effects obtained from animal models studies [32–34].

Gastrointestinal Tract. The gastrointestinal tract is one of the routes of NPs entry either by direct consumption of food and water or through swallowing of drugs, cosmetics, inhaled NPs, or dissolution from food packaging. Presently, among those, metal or metal oxide nanoparticles are most likely to be ingested due to their applications as dietary nano-supplements and nano-additives. Figure 8 illustrates the probable pathways of particles translocation in the gastrointestinal tract, which occur via endocytosis, M cells transcytosis, persorption, and paracellular uptake into and across the mucosa [35].

The information on the NPs influence on the gastrointestinal tract is small, and some of that is contradictory [35]. Most likely, through a so-called «Trojan horse effect», intracellular dissolution of metal NPs results in the releasing of ions which are responsible for the cytotoxic effects. In contrast, several studies manifest neither cytotoxic nor ROS generation effects of these nanomaterials on the intestinal cell cultures [36–38]. The adverse effects of NPs also might occur due to the altered membrane permeability and compromised integrity of the epithelial barrier. This disruption of the gut barrier could have some consequences such as absorption of pathogenic microorganisms or destructive toxins from the gut lumen). Notably, NPs affect the gut microbiota as well. The shapes and dimensions

of the NPs are some of the important factors affecting their antimicrobial activity [39]. The interference of NPs with the intestinal microbiota might be another mechanism for nanoparticle-induced gut inflammation [40, 41]. Possibly, one of the microbiota-mediated toxic effects of the NPs is colitis [42].

Cardiovascular System. The heart is a specialized target organ where nanoparticles accumulate, causing damage to the heart [43–45]. At present, most researchers have agreed that the primary toxicity effects and mechanisms are membrane damage, metal-toxicity, mechanical disturbance, oxidative stress, inflammation, mitochondrial damage, and DNA damage [46–50] (Figure 9).

With the deepening of research, the traditional toxicology model has many drawbacks, and it is bound to be gradually replaced by newer and more efficient technologies [51]. Nowadays, 3D cell culture and organ-on-a-chip technology have a microenvironment that is more similar to the human body, and there are no species differences and ethical issues; thus, they will become new models for environmental toxicology evaluation with great potential [52].

In general, the accumulation of nanoparticles into the heart can cause damage to myocardial cells and finally to cardiac function. A large amount of ROS induces severe oxidative stress damage and inflammation, and further causes abnormal elevation of myocardial enzymes, lipid peroxidation damage, mitochondrial dysfunction, and genetic toxicity [53] (Figure 10).

Nervous System. The brain has some characteristics which make it vulnerable to NPs

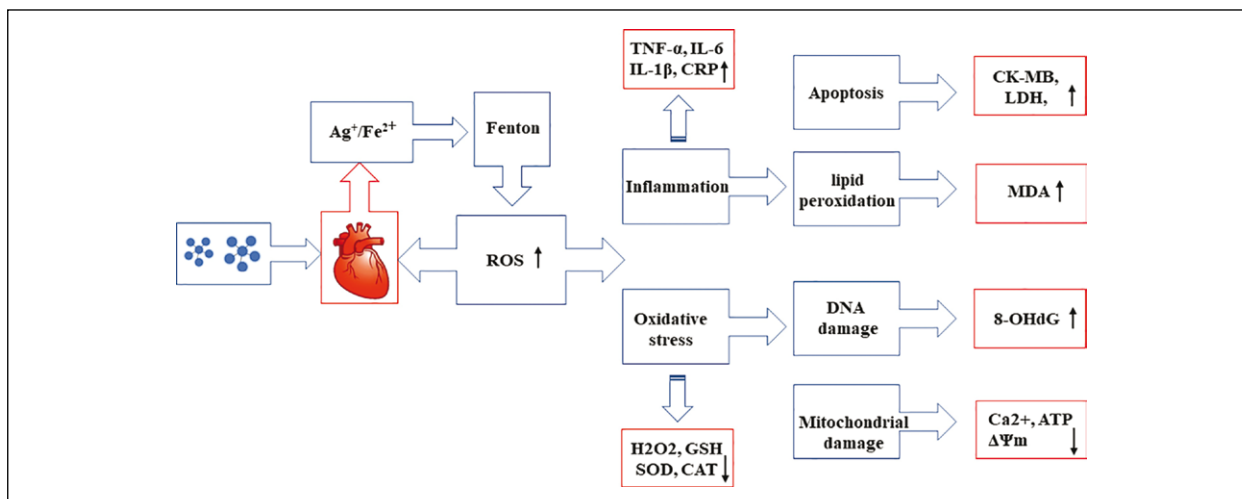


Figure 10 – A more detailed explanation of the possible cardiac damage caused by NPs. The figure is taken from [53]

harmful effects; it has a high content of easily peroxidizable unsaturated fatty acids, high oxygen consumption rate, and a relative paucity of antioxidant enzymes compared with other organs [54]. The biokinetics of inhaled nanoparticles to the brain are as follows: (a) deposited NPs on the nasal mucosa of the upper respiratory tract translocate to the olfactory bulb or the trigeminal; and (b) NPs deposited in the lower respiratory tract will cross the air-blood barrier into blood and enter the brain across the BBB or they may translocate from the enervated tracheobronchial epithelia via the vagus nerve to the brain [55].

Different physicochemical properties of NPs such as size, shape, oxidation state, agglomeration, surface charge, and coating can affect their neurotoxicity [56]. Our knowledge about the adverse effects of NPs on the human CNS is scarce and comes from an occupational disease associated with manganese that resembles Parkinson's disease and is called Manganism [57]. Due to the different types of NPs, there are diverse mechanisms of neuron injury. However, neurotoxicity of organic and metallic NPs comes from oxidative stress, apoptosis, and the inflammatory response [58]. There are other mechanisms for a neuronal injury such as the effect on pumps and voltage-gated channels which can lead to neuron excitability or apoptosis, and an increase or decrease of some neurotransmitters like glutamate, norepinephrine, serotonin, and dopamine. Disturbed homeostasis of neurotransmitters causes impaired spatial recognition memory. NPs can also alter the electrophysiological properties of neurons like synaptic plasticity, which affects spatial learning and memory ability [59].

Reproductive System. The toxicity of NPs on female reproductive and developmental health has been studied in various models. Because of genomic similarities to humans and short generation time,

the mouse is a commonly used animal model [60]. The other animal model is the zebrafish, which is the choice model for some developmental molecular mechanism studies [61]. It has been shown that TiO_2 can cause ovarian dysfunction and up-regulation of the gene related to biosynthesis of estradiol. In addition, ovarian cell damage led to hormonal imbalance and decreased fertility [62]. Decreased implantation, reduction of uterine weight, and increase of fetal resorption rate have also been reported. Many NPs including quantum dots, TiO_2 , SiO_2 , and carbon nanomaterials can penetrate the placental barrier. Placental damage caused by NPs may potentially lead to deformity or developmental retardation of the fetus. Surface modifications of NPs can reduce the transplacental ability [60]. Overall, NPs may cause altered organogenesis and morphology as well as defects in the reproductive and nervous systems of the offspring [60]. Some of the fetal toxicity of NPs in murine models are revealed as: skeletal abnormalities, decreased testosterone, sperm production, and motility, reduction of progesterone, FSH level, and corticosterone, altered gene expression associated with apoptosis, oxidative stress, and neurotransmitters in the brain [63].

Skin. Human skin, in contrast with other internal exposure routes, directly touches the NPs deposition [64]. Skin and NPs properties and ambient conditions (i.e., temperature, UV irradiation, humidity, and clothing) affect particle-skin interactions. For instance, adsorption of dermis proteins to the surface of positively charged gold nanorods results in an extensive aggregation of these particles [64, 65]. Primarily, nano-enabled products which make contact with the skin face an acellular and impermeable layer, the stratum corneum. NPs can reach viable skin cells either through the stratum corneum or the lining of hair follicles [64]. A healthy skin permits the penetration of NPs smaller than 4 nm. The penetration of

particles of 4–20 nm is also possible via hair follicles. Remarkably, particles greater than 21 nm cannot permeate through a healthy and functional skin, but they might pass through a damaged one [66]. Nevertheless, certain ingredients (e.g., urea, glycerol, and alpha hydroxyl acids) are found to enhance the percutaneous absorption of desirable NPs [64]. Numerous elicited adverse effects of NPs on human epidermal keratinocytes (HaCaT) such as ROS production, antioxidant depletion, oxidative stress, pro-inflammatory responses, cell toxicity, and apoptosis prove the possible risks of these particles [67, 68]. Other effects of NPs such as sensitivity or allergic contact dermatitis may develop due to the released metal ions which act as a sensitizer. Moreover, combined exposure of a NPs with allergens or fragrances might provoke an allergic contact dermatitis [69, 70].

Nanoparticles of any type have biological activity. This is due to an enormous increase in the surface activity of the particles during the transition from micron size to nanoscale. At this size they are ruled by the laws of quantum mechanics. They can penetrate the cell nucleus.

Being non-biological objects, interacting with cellular receptors, distorting intracellular signaling pathways and affecting the genetic regulation of the cell, they can cause a variety of pathological effects (oxidative stress, DNA damage, neuroinflammation, neurodegeneration, etc.). Therefore, with the transition from micro sizes to nanoscales, essentially remaining chemical compounds, particles of non-toxic materials can transform into extremely potent biological and chemical damaging agents. The existing possibilities of their mass use and their entry through the respiratory system, skin, gastrointestinal tract and through the introduction of injectable forms of drugs suggest that based on damaging agents of this type, weapons of mass destruction of a new type that are not subject to the Conventions on the Prohibition of Chemical and Biological Weapons can be developed. It is necessary to start developing methods for detecting nanoparticles and other nanoobjects (including their effects on biological objects) in various environments surrounding a person (organism), food, and application forms using newer approaches such as 3D tissue cultures and organs on the chips.

Authors Contribution/Вклад авторов

Elaboration of the concept of the paper; collection, analysis, and systematization of scientific literature; writing and edition of paper / Разработка концепции статьи; сбор, анализ и систематизация научной литературы; написание статьи.

Conflict of interest statement

I am declaring that I prepared the article from sources freely available on the Internet and free available publications, figures, and other possible legal sources. I, as a sole author declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. There are no funding sources to declare.

References

1. Vert M., Doi Y., Hellwich K.H. et al. Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012) // *Pure Appl. Chemistry*. 2012. V. 84. № 2. P. 377–410. <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-10-12-04>
2. Kumar N., Kumbhat S. Chapter 8. UNIQUE PROPERTIES // In: *Essentials in Nanoscience and Nanotechnology*. First Ed. John Wiley & Sons, 2016. ISBN 9781119096115.
3. Gleiter H. Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure // *Acta Mater*. 2000. V. 48. P. 1–29.
4. Scholl J.A., García-Etxarri A., Koh A.L. et al. Observation of quantum tunneling between two plasmonic nanoparticles // *Nano Lett*. 2013. V. 13. P. 564–569.
5. Issa B., Obaidat I.M., Albiss B.A., Haik Y. Magnetic nanoparticles: surface effects and properties related to biomedicine applications // *Int. J. Mol. Sci*. 2013. V. 14. № 11. P. 21266–21305. <https://doi.org/10.3390/ijms141121266>
6. Bastús N.G., Casals E., Ojea I. et al. The reactivity of colloidal inorganic nanoparticles // In: *The Delivery of Nanoparticles [Internet]* / Ed. Hashim A.A. London: IntechOpen; 2012. www.intechopen.com/books/2259. <https://doi.org/10.5772/2647>
7. Khan I., Saeed K., Khan I. Nanoparticles: properties, applications and toxicities // *Arabian J.*

- Chem. 2019. V. 12. P. 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
8. Kurapati R., Mukherjee S.P., Martin C. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2018. V. 57. P. 11722–11727. <https://doi.org/10.1002/anie.201806906>
 9. Backmann N., Kappeler N., Braun T., et al. Sensing surface PEGylation with microcantilevers // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2010. V. 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.3762/bjnano.1.2>
 10. Thi T.T.H., Pilkington E.H., Nguyen D.H. et al. Truong. The importance of poly(ethylene glycol) alternatives for overcoming PEG immunogenicity in drug delivery and bioconjugation // *Polymers.* 2020. V. 12. P. 298. <https://doi.org/10.3390/polym12020298>
 11. Soenen S., Rivera-Gil P., Montenegro J.-M. et al. Cellular toxicity of inorganic nanoparticles: Common aspects and guidelines for improved nanotoxicity evaluation // *NANO TODAY.* 2011. V. 6. № 5. P. 446–465. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.08.001>
 12. Zolnik B.S., González-Fernández A., Sadrieh N., Dobrovolskaia M.A. Nanoparticles and the immune system // *Endocrinology.* 2010. V. 151. № 2. P. 458–465. <https://doi.org/10.1210/en.2009-1082>
 13. Esmaeili F., Ghahremani M.H., Esmaeili B. et al. PLGA nanoparticles of different surface properties: preparation and evaluation of their body distribution // *Int. J. Pharm.* 2008. V. 349. № 1-2. P. 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.07.038>
 14. Mahon E., Salvati A., Bombelli F.B. et al. Designing the nanoparticle–biomolecule interface for “targeting and therapeutic delivery” // *J. Control. Release.* 2012. V. 161. № 2. P. 164–174.
 15. Binnemars-Postma K.A., Ten Hoopen H.W, Storm G., Prakash J. Differential uptake of nanoparticles by human M1 and M2 polarized. Macrophages: protein corona as a critical determinant // *Nanomedicine (Lond).* 2016. V. 11. № 22. P. 2889–2902. <https://doi.org/10.2217/nmm-2016-0233>
 16. Smulders S., Kaiser J.P., Zuin S. et al. Contamination of nanoparticles by endotoxin: evaluation of different test methods // *Part Fibre Toxicol.* 2012. V. 9. P. 41. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-9-41>
 17. Lieder R., Petersen P.H., Sigurjónsson Ó.E. Endotoxins—the invisible companion in biomaterials research // *Tissue Eng. Part B Rev.* 2013. V. 19. № 5. P. 391–402. <https://doi.org/10.1089/ten.TEB.2012.0636>
 18. Vetten M.A., Yah C.S., Singh T., Gulumian M. Challenges facing sterilization and depyrogenation of nanoparticles: effects on structural stability and biomedical applications // *Nanomedicine.* 2014. V. 10. № 7. P. 1391–1399. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2014.03.017>
 19. Sharma L.R., Subedi A., Shah B.K. Anaphylaxis to pegylated liposomal Doxorubicin: a case report // *West Indian Med. J.* 2014. V. 63. № 4. P. 376–377. <https://doi.org/10.7727/wimj.2013.270>
 20. Kotchey G.P., Hasan S.A., Kapralov A.A. et al. A natural vanishing act: the enzyme-catalyzed degradation of carbon nanomaterials // *Acc. Chem. Res.* 2012. V. 45. № 10. P. 1770–1781. <https://doi.org/10.1021/ar300106h>
 21. Eisenbarth S.C., Colegio O.R., O'Connor W. et al. Crucial role for the Nalp3 inflammasome in the immunostimulatory properties of aluminium adjuvants // *Nature.* 2008. V. 453. № 7198. P. 1122–1126. <https://doi.org/10.1038/nature06939>
 22. Albornoz E.A., Amarilla A.A., Modhiran N. et al. SARS-CoV-2 drives NLRP3 inflammasome activation in human microglia through spike protein // *Mol. Psychiatry.* 2022. <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01831-0>
 23. van Zijverden M., Granum B. Adjuvant activity of particulate pollutants in different mouse models // *Toxicology.* 2000. V. 152. № 1-3. P. 69–77. [https://doi.org/10.1016/s0300-483x\(00\)00293-6](https://doi.org/10.1016/s0300-483x(00)00293-6)
 24. Lutsiak M.E., Kwon G.S., Samuel J. Biodegradable nanoparticle delivery of a Th2-biased peptide for induction of Th1 immune responses // *J. Pharm. Pharmacol.* 2006. V. 58. № 6. P. 739–747. <https://doi.org/10.1211/jpp.58.6.0004>
 25. Xiang S.D., Scholzen A., Minigo G. et al. Pathogen recognition and development of particulate vaccines: does size matter? // *Methods.* 2006. V. 40. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2006.05.016>
 26. Omlor A.J., Nguyen J., Bals R., Dinh Q.T. Nanotechnology in respiratory medicine // *Respir. Res.* 2015. V. 16(1). P. 64. <https://doi.org/10.1186/s12931-015-0223-5>
 27. Andujar P., Lanone S., Brochard P., Boczkowski J. Respiratory effects of manufactured nanoparticles // *Rev. Mal Respir.* 2011. V. 28. № 8. P. e66–75. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2011.09.008>
 28. Karmakar A., Zhang Q., Zhang Y. Neurotoxicity of nanoscale materials // *J. Food Drug Anal.* 2014. V. 22. № 1. P. 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.012>
 29. Wang, L., Davidson D.C., Castranova V., Rojanasakul Y. Pulmonary effects of carbon nanomaterials // In: *Biomedical Applications and Toxicology of Carbon Nanomaterials* / Eds. Chen C., Wang H. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. P. 163–193. <https://doi.org/10.1002/9783527692866.ch6>
 30. Xu J., Alexander D.B., Futakuchi M. et al. Size- and shape-dependent pleural translocation, deposition, fibrogenesis, and mesothelial proliferation by multiwalled carbon nanotubes // *Cancer Sci.* 2014. V. 105. № 7. P. 763–769. <https://doi.org/10.1111/cas.12437>
 31. Wang Q., Wang Q., Zhao Z., et al. Pleural translocation and lesions by pulmonary exposed multiwalled carbon nanotubes // *J. Toxicol. Pathol.* 2020. V. 33. № 3. P. 145–151. <https://doi.org/10.1293/tox.2019-0075>
 32. Brouwer D., Kuijpers E., Bekker C. et al. Field and laboratory measurements related to occupational and consumer exposures // In: *Safety of Nanomaterials along Their Lifecycle: Release, Exposure, and Human Hazards* / Eds. Wohlleben W., Kuhlbusch T.A.J., Schnekenburger J., Lehr C.-M. CRC Press, 2014. P. 277–314.
 33. Working, IARC Monograph. Carcinogenicity of fluoro-edenite, silicon carbide fibres and whiskers,

- and carbon nanotubes // *Ann. Ist. Super Sanita*. 2014. V. 50. P. 111–118.
34. Shvedova A.A., Kisin E.R., Yanamala N. et al. MDSC and TGF β are required for facilitation of tumor growth in the lungs of mice exposed to carbon nanotubes // *Cancer. Res.* 2015. V. 75. № 8. P. 1615–1623. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-14-2376>
 35. Powell J.J., Faria N., Thomas-McKay E., Pele L.C. Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract // *J. Autoimmun.* 2010. V. 34. № 3. P. J226–J233. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.006>
 36. Zhang T., Xu M., He L. et al. Synthesis, characterization and cytotoxicity of phosphoryl choline-grafted water-soluble carbon nanotubes // *Carbon*. 2008. V. 46. № 13. P. 1782–1791. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.07.033>
 37. Bouwmeester H., Poortman J., Peters R.J. et al. Characterization of translocation of silver nanoparticles and effects on whole-genome gene expression using an in vitro intestinal epithelium coculture model // *ACS Nano*. 2011. V. 5. № 5. P. 4091–4103. <https://doi.org/10.1021/nn2007145>
 38. Lai X., Blazer-Yost B.L., Clack J.W. et al. Protein expression profiles of intestinal epithelial co-cultures: effect of functionalised carbon nanotube exposure // *Int. J. Biomed. Nanosci. Nanotechnol.* 2013. V. 3. № 1–2. P. 127–162. <https://doi.org/10.1504/IJBNN.2013.054508>
 39. Chen H., Wang B., Gao D. et al. Broad-spectrum antibacterial activity of carbon nanotubes to human gut bacteria // *Small*. 2013. V. 9. № 16. P. 2735–2746. <https://doi.org/10.1002/smll.201202792>
 40. Chen H., Wang B., Zhao Y., Feng W. Nanoparticle effects on gastrointestinal microbiome // *Nanomed. Nanotechnol. Biol. Med.* 2016. V. 12. № 2. P. 457.
 41. Bouwmeester H., van der Zande M., Jepson M.A. Effects of food-borne nanomaterials on gastrointestinal tissues and microbiota // *Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol.* 2018. V. 10. № 1. P. e1481. <https://doi.org/10.1002/wnan.1481>
 42. Pietroiusti A., Magrini A., Campagnolo L. New frontiers in nanotoxicology: gut microbiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2016. V. 299. P. 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.12.017>
 43. Huerta-García E., Zepeda-Quiroz I., Sánchez-Barrera H., et al. Internalization of titanium dioxide nanoparticles is cytotoxic for H9c2 rat cardiomyoblasts // *Molecules*. 2018. V. 23. № 8. P. 1955. <https://doi.org/10.3390/molecules23081955>
 44. Panov V., Minigalieva I., Bushueva T. et al. Some peculiarities in the dose dependence of separate and combined in vitro cardiotoxicity effects induced by CdS and PbS nanoparticles with special attention to hormesis manifestations // *Dose Response*. 2020. V. 18. № 1. <https://doi.org/10.1177/1559325820914180>
 45. Savi M., Rossi S., Bocchi L. et al. Titanium dioxide nanoparticles promote arrhythmias via a direct interaction with rat cardiac tissue // *Part Fibre Toxicol.* 2014. V. 11. P. 63. <https://doi.org/10.1186/s12989-014-0063-3>
 46. Akhtar M.J., Ahamed M., Alhadlaq H. Gadolinium oxide nanoparticles induce toxicity in human endothelial HUVECs via lipid peroxidation, mitochondrial dysfunction and autophagy modulation // *Nanomaterials (Basel)*. 2020. V. 10. № 9. P. 1675. <https://doi.org/10.3390/nano10091675>
 47. Li Y., Li F., Zhang L., et al. Zinc oxide nanoparticles induce mitochondrial biogenesis impairment and cardiac dysfunction in human iPSC-derived cardiomyocytes // *Int. J. Nanomedicine*. 2020. V. 15. P. 2669–2683. <https://doi.org/10.2147/IJN.S249912>
 48. Salehcheh M., Alboghobeish S., Dehghani M.A., Zeidoooni L. Multi-walled carbon nanotubes induce oxidative stress, apoptosis, and dysfunction in isolated rat heart mitochondria: protective effect of naringin // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2020. V. 27. № 12. P. 13447–13456. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07943-w>
 49. Song Y., Wu L., Cao J., Song B. Preparation of nano zinc particles and evaluation of its application in mouse myocardial infarction model // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2021. V. 21. № 2. P. 1196–1201. <https://doi.org/10.1166/jnn.2021.18662>
 50. Trigueiro N.S.S., Gonçalves B.B., Dias F.C. et al. Co-exposure of iron oxide nanoparticles and glyphosate-based herbicide induces DNA damage and mutagenic effects in the guppy (*Poecilia reticulata*) // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2021. V. 81. P. 103521. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103521>
 51. Pennarossa G., Arcuri S., De Iorio T. et al. Current advances in 3D tissue and organ reconstruction // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22. № 2. P. 830. <https://doi.org/10.3390/ijms22020830>
 52. Chen X., Zhang Y.S., Zhang X., Liu C. Organ-on-a-chip platforms for accelerating the evaluation of nanomedicine // *Bioact. Mater.* 2020. V. 6. № 4. P. 1012–1027. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.022>
 53. Cheng Y., Chen Z., Yang S. et al. Nanomaterials-induced toxicity on cardiac myocytes and tissues, and emerging toxicity assessment techniques // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 800. P. 149584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149584>
 54. Hu Y.L., Gao J.Q. Potential neurotoxicity of nanoparticles // *Int. J. Pharm.* 2010. V. 394. № 1–2. P. 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.04.026>
 55. Kreyling W.G. Discovery of unique and ENM-specific pathophysiological pathways: Comparison of the translocation of inhaled iridium nanoparticles from nasal epithelium versus alveolar epithelium towards the brain of rats // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2016. V. 299. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.02.004>
 56. Fu P.P., Xia Q., Hwang H.M. et al. Mechanisms of nanotoxicity: generation of reactive oxygen species // *J. Food Drug Anal.* 2014. V. 22. № 1. P. 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.005>
 57. Dobson A.W., Erikson K.M., Aschner M. Manganese neurotoxicity // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2004. V.

1012. P. 115–128. <https://doi.org/10.1196/annals.1306.009>
58. Song B., Zhang Y., Liu J. et al. Is Neurotoxicity of Metallic Nanoparticles the Cascades of Oxidative Stress? // *Nanoscale Res. Lett.* 2016. V. 11. № 1. P. 291. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1508-4>
59. Han D., Tian Y., Zhang T. et al. Nano-zinc oxide damages spatial cognition capability via over-enhanced long-term potentiation in hippocampus of Wistar rats // *Int. J. Nanomedicine.* 2011. V. 6. P. 1453–1461. <https://doi.org/10.2147/IJN.S18507>
60. Sun J., Zhang Q., Wang Z., Yan B. Effects of nanotoxicity on female reproductivity and fetal development in animal models // *Int. J. Mol. Sci.* 2013. V. 14. № 5. P. 9319–9337. <https://doi.org/10.3390/ijms14059319>
61. Dooley K., Zon L.I. Zebrafish: a model system for the study of human disease // *Curr. Opin. Genet. Dev.* 2000. V. 10. № 3. P. 252–256. [https://doi.org/10.1016/s0959-437x\(00\)00074-5](https://doi.org/10.1016/s0959-437x(00)00074-5)
62. Gao G., Ze Y., Li B. et al. Ovarian dysfunction and gene-expressed characteristics of female mice caused by long-term exposure to titanium dioxide nanoparticles // *J. Hazard Mater.* 2012. V. 243. P. 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.049>
63. Shimizu M., Tainaka H., Oba T., Mizuo K. et al. Maternal exposure to nanoparticulate titanium dioxide during the prenatal period alters gene expression related to brain development in the mouse // *Part Fibre Toxicol.* 2009. V. 6. P. 20. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-20>
64. Monteiro-Riviere, N.A. Safety of nanoparticle skin penetration / In: Percutaneous Penetration Enhancers Chemical Methods in Penetration Enhancement: Nanocarriers / Eds. Dragicevic N., Maibach I.H. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. P. 363–376. ISBN 9783662478622.
65. Mahmoud N.N., Al-Qaoud K.M., Al-Bakri A.G. et al. Colloidal stability of gold nanorod solution upon exposure to excised human skin: Effect of surface chemistry and protein adsorption // *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 2016. V. 75. P. 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2016.02.020>
66. Larese Filon F., Bello D., Cherrie J.W., et al. Occupational dermal exposure to nanoparticles and nano-enabled products: Part I-Factors affecting skin absorption // *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2016. V. 219. № 6. P. 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.05.009>
67. Shvedova A.A., Castranova V., Kisin E.R. et al. Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells // *J. Toxicol. Environ. Health A.* 2003. V. 66. № 20. P. 1909–1926. <https://doi.org/10.1080/713853956>
68. Wright C., Iyer A.K., Wang L. et al. Effects of titanium dioxide nanoparticles on human keratinocytes // *Drug Chem Toxicol.* 2017. V. 40. № 1. P. 90–100. <https://doi.org/10.1080/01480545.2016.1185111>
69. Hirai T., Yoshioka Y., Higashisaka K., Tsutsumi Y. Potential hazards of skin exposure to nanoparticles // In: *Biological Effects of Fibrous and Particulate Substances* / Eds. Otsuki T., Yoshioka Y., Holian A. Japan: Springer, 2016. P. 123–135. ISBN 9784431557319
70. Roach K.A., Stefaniak A.B., Roberts J.R. Metal nanomaterials: immune effects and implications of physicochemical properties on sensitization, elicitation, and exacerbation of allergic disease // *J. Immunotoxicol.* 2019. V. 16. № 1. P. 87–124. <https://doi.org/10.1080/1547691X.2019.1605553>

Author

Centre of Experimental Medicine, SAS, Dubravská cesta 9, 841 04 Bratislava, Slovakia Faculty of Management Comenius University, Odbojárov 10, 820 05 Bratislava, Slovakia.

Ján Lakota, MD, PhD.

Contact person: Ján Lakota; jan.lakota@savba.sk

Наночастицы как потенциальные агенты химического и биологического оружия

Ян Лакота

Центр экспериментальной медицины, SAS, Dubravská cesta 9, 841 04 Братислава, Словакия Факультет менеджмента Коменский университет, Odbojárov 10, 820 05 Братислава, Словакия

Получено 25 октября 2022. Принято к публикации 23 декабря 2022 г.

Широкое распространение в промышленности, медицине, сельском хозяйстве и других областях деятельности человека объектов наноразмеров ставит вопрос о возможности их двойно-

го использования, под которой в данной работе подразумевается использование для преднамеренного массового поражения людей. *Цель работы* – рассмотреть наночастицы в качестве потенциальных агентов химико-биологического оружия. Показано, что наночастицы любого типа обладают биологической активностью. Это связано с увеличением поверхностной активности частиц при переходе с микронного размера к наноразмерам и их способности проникать в ядро клетки. Будучи не биологическими объектами, взаимодействуя с клеточными рецепторами, искажая внутриклеточные сигнальные пути и влияя на генетическую регуляцию клетки, они способны вызвать разнообразные патологические эффекты (окислительный стресс, нейровоспаление, нейродегенерация и др.). Поэтому с переходом от микроразмеров к наноразмерам, по своей сути оставаясь химическими соединениями, частицы нетоксичных материалов могут трансформироваться в потенциальные биолого-химические поражающие агенты. Существующие возможности их массового применения через органы дыхания, кожу, желудочно-кишечный тракт и путем введения инъекционных форм лекарственных средств позволяют утверждать, что на основе поражающих агентов данного типа может быть разработано оружие массового поражения нового типа, не подпадающее под действие Конвенций по запрещению химического и биологического оружия. Необходимо уже сейчас приступить к разработке методов обнаружения наночастиц и других нанообъектов в различных средах, окружающих человека, продуктах питания и лекарственных формах.

Ключевые слова: *внутриклеточные сигнальные пути; генотоксические эффекты; наноматериалы; нанотехнологии; наночастицы; окислительный стресс; оружие массового поражения; токсичность наночастиц.*

Библиографическое описание: *Лакота Ян. Наночастицы как потенциальные агенты химического и биологического оружия // Вестник войск РХБ защиты. 2022. V. 6. № 1. P. 304–319. EDN: CGEFOD. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-304-319>*

Информация о конфликте интересов

Я заявляю, что подготовил статью из источников, находящихся в свободном доступе в Интернете, а также свободно доступных публикаций, рисунков и других возможных легальных источников. Я, как единственный автор, заявляю, что исследование проводилось при отсутствии каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья была рецензирована двумя экспертами в соответствующей области. Рецензии доступны в редакции и в базе данных Российского индекса научного цитирования.

Финансирование. Источников финансирования для декларирования нет.

Список источников / References

Стр. 315–318.

Об авторе

Центр экспериментальной медицины, SAS, Dubravská cesta 9, 841 04 Братислава, Словакия Факультет менеджмента Коменский университет, Odbojárov 10, 820 05 Братислава, Словакия.

Ян Лакота. MD, PhD

Контактное лицо: Ян Лакота; jan.lakota@savba.sk

Современные психоактивные вещества и их обнаружение в биомедицинских пробах

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022
УДК: 615.214.2; 343.9.018
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-320-341>
<https://elibrary.ru/eukkms>



А.М. Григорьев, В.Н. Фатеенков

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр»
Министерства обороны Российской Федерации, 111004, Российская Федерация,
г. Москва, Проезд Энтузиастов, д. 19

Поступила 25.09.2022 г. Принята к публикации 23.12.2022 г.

Научные и технологические достижения середины и конца XX в. привели к созданию большого количества новых психоактивных веществ (НПВ), разнообразных по составу и спектру действия. Первичными этапами борьбы с распространением НПВ являются информированность об их характеристиках, а также возможность обнаружения как самих веществ, так и биомаркеров их употребления (метаболитов) в биологических объектах человека. *Цель работы* – обзор психоактивных соединений и способов их обнаружения, выполняемых с диагностическими целями. В работе представлены краткие характеристики наиболее распространенных НПВ, а также особенности их метаболизма в организме человека. Показано, что анализ биопроб, отбираемых у предполагаемых потребителей наркотиков, сложен ввиду малого содержания аналитов, влияния матрицы, метаболизма и образования разнообразных артефактов. Общая схема скрининга биообъектов предполагает наличие двух стадий – предварительного экспресс-анализа, выполняемого с помощью иммунохимических тест-систем, и подтверждающего анализа, выполняемого методами газовой и жидкостной хроматомасс-спектрометрии. В статье рассмотрены возможности и ограничения целевого и нецелевого скрининга. Предметом специального рассмотрения стали проблемы применения хроматомасс-спектрометрических методов анализа НПВ в российских условиях – вопросы доступа к стандартным веществам, поисковым библиотекам и т.д. В работе также представлены краткие характеристики отдельных семейств НПВ – стимуляторов, синтетических каннабиноидов, синтетических опиоидов и галлюциногенов. Кроме того, в статье показано, что в ряде иностранных армий, в частности, в вооруженных силах Украины (ВСУ), наркотики и психостимуляторы используются для создания «бесстрашных солдат». Так, в пробах с объектов, доставленных с позиций ВСУ для анализа, были обнаружены метадон, амфетамин и другие психоактивные вещества, а также психотомиметик – структурное и фармакологическое подобие запрещенного ВЗ.

Ключевые слова: амфетамин; биообъекты; газовая хроматомасс-спектрометрия; галлюциногены; жидкостная хроматомасс-спектрометрия; иммунохимический анализ; метаболизм; метадон; наркотические средства; психоактивные вещества; Россия; синтетические каннабиноиды; синтетические опиоиды; скрининг; стимуляторы; Украина; экспресс-анализ; ВЗ.

Библиографическое описание: Григорьев А.М., Фатеенков В.Н. Современные психоактивные вещества и их обнаружение в биомедицинских пробах // Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т. 6, № 4. С. 320-341. EDN: EUKKMS. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-320-341>

К военно-химическим аспектам проблемы наркомании относятся предпринимаемые в ряде зарубежных армий – в частности, в вооруженных силах Украины (ВСУ), попытки использовать препараты, содержащие психоактивные вещества, для формирования «бесстрашного солдата». Научные и технологи-

ческие достижения середины и конца XX в. привели к созданию большого количества новых психоактивных веществ (НВП), чрезвычайно разнообразных как по составу, так и по спектру действия. Первичными этапами борьбы с распространением классических и новых психоактивных веществ является ин-

формированность об их характеристиках и возможность обнаружения как самих веществ, так и биомаркеров их употребления (метаболитов) в биологических объектах человека.

Цель работы – обзор психоактивных соединений и способов их обнаружения, выполняемый с диагностическими целями.

В ходе исследования анализировались характеристики наиболее распространенных НПВ, особенности их метаболизма в организме человека, возможности и ограничения скрининга таких соединений и использование психостимуляторов в ВСУ для создания «бесстрашных солдат».

Законодательное определение наркотических средств и психоактивных веществ. Наркотические средства и психотропные вещества – обширная и чрезвычайно разнообразная группа веществ или компонентов смесей (в том числе природных биологических объектов), которой затруднительно дать исчерпывающее и непротиворечивое определение.

Во-первых, само понятие «наркотическое средство» не предполагает указания однозначно идентифицируемого вещества (или их смеси), подлинность и концентрация которых может быть подтверждена физико-химическим инструментальным анализом. В качестве примера можно привести: (1) растительные объекты – каннабис (марихуана), лист кока, маковая солома; (2) смеси, получаемые из растительных объектов – гашиш и гашишное масло (продукты переработки каннабиса), экстракт маковой соломы, опий; (3) продукты химического синтеза – кустарно изготовленные препараты из эфедрина, псевдоэфедрина, фенилпропаноламина или из препаратов, их содержащих¹. Каждый из перечисленных объектов должен содержать идентифицируемое психоактивное вещество, однако его допустимая концентрация не принимается во внимание и, следовательно, определяется только возможностями аналитической лаборатории. Поэтому для внесения однозначности далее в тексте понятие «наркотик» будет ограничено только определенными химическими структурами, допускающими неопределенность только в плане оптической изомерии.

Во-вторых, известная официальная трактовка понятия «наркотическое средство» предполагает обязательное наличие трех взаимосвязанных факторов (медицинский, социальный и юридический) [1, 2], из которых достаточно определенным можно считать только последний.

Медицинский фактор. Наркотическое вещество должно оказывать специфическое действие на центральную нервную систему человека, причем все разнообразие формируемых психоэффектов подразделяется на три основных направления – стимулирующее, седативное и галлюциногенное [1]. Медицинский фактор можно считать сравнительно хорошо определенным, поскольку, кроме психоактивности, он должен предполагать наличие дополнительной явной симптоматики, в том числе: формирование зависимости (физической или психической), толерантности (необходимость увеличения дозы) и абстиненции (токсикогенные явления, вызванные прекращением приема наркотика).

Однако существует значительное количество веществ, отнесенных к наркотикам при крайне ограниченной информации о медицинском факторе их употребления. В первую очередь это связано с затруднениями в получении необходимой медицинской статистики. Очень часто опубликованные данные собраны по сообщениям в социальных сетях в сети Интернет. Для немалого количества веществ, считающихся наркотиками, медицинский фактор почти не определен ввиду отсутствия информации о психоэффектах. Более того, известные характеристики, полученные *in vitro* (например, активность по отношению к рецепторам), могут уверенно указывать на малую психоактивность или ее отсутствие. В наибольшей степени это относится к некоторым веществам семейства синтетических каннабиноидов («спайсы»), синтезированных Дж. Хуффманом с сотр. (англ. John William Huffman, 1932–2022) и отнесенных к наркотикам в 2010 г.

Социальный фактор. Он определен значительно хуже, чем медицинский, поскольку является результатом его влияния на крупные общественные группы и, следовательно, содержит дополнительные подфакторы, которые трудно или невозможно предсказать. Так, существует огромное количество психоактивных веществ, для которых значимость медицинского фактора является безусловной. Тем не менее, на рынках наркотиков распространяются только некоторые из них, причем определить причины предпочтения крайне затруднительно. Не исключено, что весомой причиной является вмешательство субъективных подфакторов – когда решение о выборе распространяемого вещества принимают руководители крупных наркоконцернов.

¹ Постановление Правительства РФ от 30 июня 1998 г. № 681 (ред. от 24 января 2022 г.) «Об утверждении перечня наркотических средств, психотропных веществ и их прекурсоров, подлежащих контролю в Российской Федерации». URL: https://мвд.рф/upload/site25/folder_page/024/045/581/Postanovlenie_Pravitelstva_RF_ot_30_06_1998_N_681_red__ot.pdf (дата обращения: 03.10.2022).

Юридический фактор. Решение о законодательном ограничении оборота вещества является фактической квалификацией его в качестве наркотика. При этом юридический фактор должен базироваться на строгих заключениях двух других факторов. Это правило, в целом, соблюдалось при принятии Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июня 1998 г. № 681 в базовой редакции («Об утверждении перечня наркотических средств, психотропных веществ и их прекурсоров, подлежащих контролю в Российской Федерации»). Данное постановление было принято в условиях преимущественного распространения «классических» наркотиков – веществ, известных человечеству ранее.

Однако с конца 1990-х гг. появились и начали быстро распространяться новые психоактивные вещества искусственного происхождения (НПВ), и законодательные органы государств попали в цейтнот. Отмечены случаи продаж продуктов, содержащих НПВ, через уличные автоматы розничной торговли. Естественным следствием необходимости быстрого реагирования на распространение НПВ стали следующие подходы.

1. Снижение роли медицинского и социального факторов при помещении нового вещества под законодательный контроль. Поводом для ограничения оборота нового вещества может стать его появление в продаже, что фиксируется при физико-химическом анализе продуктов, изымаемых правоохранительными органами. Исследования медицинского и социального факторов могут носить лишь оценочный характер.

2. Введение правительствами ряда стран «законов о производных», в которых под контроль помещаются не конкретные вещества, а их группы, объединенные сходством структур, несмотря на отсутствие информации об их свойствах. Вслед за другими государствами, в России подобное законодательство было принято в 2012 г.² (Постановление Правительства РФ от 19 ноября 2012 г. № 1178). Оно лишь закрепило уже существующую практику отношения НПВ к понятию «производное», которая появилась на два года ранее³ (Постановление Правительства РФ от 30 октября 2010 г. № 882) и была технически обоснована ведомственными инструкциями Федеральной службы по контролю за оборотом наркотиков, Министер-

ства внутренних дел и Министерства юстиции России.

Контроль оборота наркотиков в России. Согласно Постановлению Правительства РФ № 681 от 30 июня 1998 г. (ред. от 24 января 2022 г.), существует три уровня ограничений психотропных веществ и смесей. Ниже они перечислены в порядке уменьшения жесткости контроля (приведены количества позиций без учета производных и прекурсоров).

Список I (наркотические средства, психотропные вещества и их прекурсоры, оборот которых в Российской Федерации запрещен). Содержит около 370 позиций (в том числе амфетамин, героин, дезоморфин, каннабис, LSD, маковая солома, 3-метилфентанил). Операции с этими веществами допустимы только в лицензированных организациях (лабораториях).

Список II (наркотические средства, психотропные вещества и их прекурсоры, оборот которых в Российской Федерации ограничен и в отношении которых устанавливаются меры контроля). Содержит около 66 позиций (в том числе карфентанил, кодеин, кокаин, морфин, промедол, фентанил, кетамин). В частности, вещества этого списка используются при общей анестезии в стационарных или полевых условиях.

Список III (наркотические средства, психотропные вещества и их прекурсоры, оборот которых в Российской Федерации ограничен и в отношении которых допускается исключение некоторых мер контроля). Содержит около 92 позиций (в том числе апрофен, декстрометорфан, диазепам, клоназепам, тарен, фенобарбитал). Многие вещества этого списка распространяются через аптечные сети при наличии рецепта.

В *дополнительном списке* (список IV) перечислены прекурсоры, оборот которых в Российской Федерации ограничен и в отношении которых устанавливаются меры контроля (в том числе уксусный ангидрид, бензальдегид, псевдоэфедрин, эфедрин, фенэтиламин).

Новые психоактивные вещества. Новые синтетические психоактивные вещества появились на рынке психоактивных средств и в XX в. Однако их появление носило эпизодический характер и не всегда было надежно подтверждено. Примерно с 2005 г. Европейское мониторинговое агентство по наркотикам и наркопотреблению (The European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction, EMCDDA)

² Постановление Правительства РФ от 19 ноября 2012 г. № 1178 «О внесении изменения в перечень наркотических средств, психотропных веществ и их прекурсоров, подлежащих контролю в Российской Федерации». URL: <https://base.garant.ru/70262354/?ysclid=la71a793b2471891809> (дата обращения: 03.10.2022).

³ Постановление Правительства РФ от 30 октября 2010 г. № 882 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам, связанным с оборотом наркотических средств и психотропных веществ» (с изменениями и дополнениями). URL: <https://base.garant.ru/12180026/?ysclid=la71dg2zd810167834> (дата обращения: 03.10.2022).

и аналогичная структура ООН (The United Nations Office on Drugs and Crime, UNODC – Служба по наркотикам и преступности,) начали систематический обзор рынка НПВ (рисунок 1)^{4,5}. В структуре Евросоюза для этого была создана Система раннего предупреждения (англ. The EU Early Warning System, EWS), куда правоохранительные органы разных государств могли сообщать об изъятии нового вещества, сопроводив сообщение аналитическими характеристиками согласно классическим правилам идентификации в органической химии (как правило, спектры ядерного магнитного резонанса, масс-спектры низкого и высокого разрешения, спектры поглощения в инфракрасной области). Сообщение в EWS обычно не содержит фармакологических характеристик; эти сведения появляются в научной периодике несколько позже.

Значительная часть НПВ не является действительно новыми. В ранний период их распространения на рынке появлялись вещества, сведения о которых (синтез, физико-химические и некоторые фармакологические характеристики) были уже опубликованы. Однако впоследствии они были вытеснены действительно новыми веществами, характеристики которых отсутствовали и поэтому должны были нарабатываться и распространяться среди аналитиков. Это свидетельствует о повышении возможностей изготовителей, включая предсказание психоактивных структур (или практический биоскрининг), оптимизация синтеза, инструментальный анализ и возможность натуральных испытаний.

Важнейшей причиной появления НПВ является рост возможностей телекоммуникаций, что позволяет производителям легко находить синтетические прописи для веществ, представляющих интерес, закупать необходимые реактивы и столь же легко организовывать каналы сбыта в пределах планеты. Еще одной причиной можно назвать простоту синтеза подавляющего числа НПВ. Несомненно, особую важность имеют социологические факторы, но рассмотрение этой проблемы выходит за рамки настоящей статьи.

Согласно диаграмме на рисунке 1, количество появляющихся НПВ увеличивалось вплоть до 2014–2015 гг. В это время производители активно изменяли структуры веществ, пытаясь уйти от законодательных ограничений. Как только продаваемое вещество попадало под контроль, его продажи прекращались, и

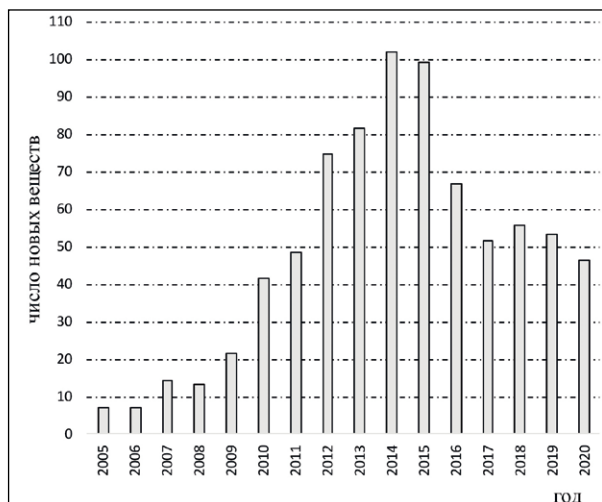


Рисунок 1 – Количество новых психоактивных веществ, зафиксированных на рынках наркотиков с 2005 г. по данным Европейского мониторингового агентства по наркотикам и наркопотреблению (European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. European Drug Report 2021: Trends and Developments. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
URL: <https://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/13838/TDAT21001ENN.pdf>;
дата обращения: 03.10.2022)

на рынок поступали новые, заранее разработанные вещества. Эта схема минимизировала конфликт продавцов с государственными законами. Она же привела к непрерывной законодательной гонке, в которой государства стали догоняющими. Как правило, НПВ, попавшее под запрет, более не продавалось, и большинство НПВ, появившихся когда-то, в настоящее время на рынке отсутствуют. Отсюда появилось понятие «время жизни» НПВ, которое определяется скоростью реагирования правоохранительных и законодательных органов.

Спад количества новых НПВ с возможной стабилизацией, наблюдаемый в последние годы, можно объяснить: (1) привыканием потребителей наркотиков к определенным веществам, что формирует устойчивый спрос на них и делает приемлемыми убытки продавцов из-за действий правоохранительных органов и (2) дискомфорта условиями для производителей, стремящихся унифицировать производство и снизить затраты на новые разработки.

За весь период наблюдения (до конца 2021г.) EMCDDA зарегистрировала около 880 НПВ.

⁴ European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. European Drug Report 2021: Trends and Developments. Publications Office of the European Union, Luxembourg. URL: <https://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/13838/TDAT21001ENN.pdf> (дата обращения: 03.10.2022).

⁵ United Nations Office on Drugs and Crime. World Drug Report 2022. 4. Drug Market Trends. United Nations Publication, Vienna. URL: https://www.unodc.org/res/wdr2022/MS/WDR22_Booklet_4.pdf (дата обращения: 03.10.2022).

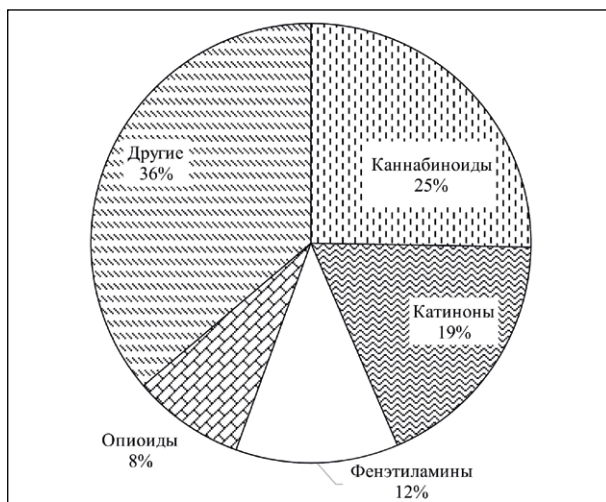


Рисунок 2 – Распределение НПВ по структурным и фармакологическим особенностям по данным Европейского мониторингового агентства по наркотикам и наркопотреблению (European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. European Drug Report 2022: Trends and Developments. Publications Office of the European Union, Luxembourg. URL: <https://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/14644/TDAT22001ENN.pdf>; дата обращения: 03.10.2022)

К настоящему времени сложилась общая классификация НПВ. Она имеет весьма условный характер и основана как на структурных, так и на фармакологических характеристиках (рисунок 2). Отсутствие более жестких критериев классификации объясняется повышенным структурным разнообразием одних фармакологически подобных семейств (синтетические каннабиноиды, опиоиды) и сравнительно малой вариабельностью структурного ядра других (катиноны, фенэтиламины). Сектор «Другие» включает ряд малочисленных семейств (триптамины, арилалкиламины, бензодиазепины, арилциклогексиламины, пиперазины, пиперидины и пирролидины, растения и их экстракты, аминоканноиды и неклассифицированные вещества). Ниже будут рассмотрены четыре семейства (катиноны, фенэтиламины, синтетические каннабиноиды, опиоиды), выбранные на основе общественной значимости и структурного разнообразия.

Метаболизм НПВ в человеческом организме. Как и любой ксенобиотик, НПВ подвержены метаболическим трансформациям, которые завершаются формированием структур, достаточно гидрофильных для облегчения экскреции [3, 4]. Значительная часть метаболитов (возможно, вместе с исходным веществом) экскретируется с мочой. Поэтому доля метаболитов по отношению к неизмененному НПВ в моче и

крови, в целом, определяется гидрофильностью исходного вещества. Следовательно, из выбранных НПВ в наименьшей степени подвержены метаболическим модификациям катиноны и фенэтиламины, а в наибольшей – синтетические каннабиноиды. Степень метаболизма опиоидов определяется их структурой.

Вид образуемых метаболитов и их доли в смеси определяются как исходной структурой ксенобиотика, так и физиологией (состоянием) организма. Количество обнаруженных метаболитов может превышать многие десятки. В качестве примера приведены основные направления метаболизма синтетического каннабиноида ММВ-022, присутствие которого на рынке психоактивных средств в РФ зафиксировано в конце 2019 г. (рисунок 3) [5].

В ходе первой (I) фазы метаболизма исходная структура может быть как упрощена, так и усложнена, а основными направлениями являются гидролиз и окисление. Если ксенобиотик является сложным эфиром или амидом, то в метаболической смеси присутствуют продукты гидролиза, причем благодаря наличию кровяных эстераз сложные эфиры гидролизуются уже в крови, и в метаболическом наборе доминируют продукты. Как правило, амиды гидролизуются медленнее, чем сложные эфиры.

Окислительные процессы, катализируемые преимущественно изоформами цитохрома P450, чрезвычайно разнообразны и, ввиду сложности окислительных ферментных комплексов, локализованы, в основном, в печени. Наиболее простым направлением является гидроксирование алифатического (преимущественно) или ароматического остатка. Алифатические цепи подвержены карбоксилированию; ароматические остатки и изолированные двойные связи – образованию дигидродиолов. N- или O-деалкилирование – сложный процесс, в начальной стадии которого, по-видимому, происходит окисление α-метиленовой группы. Если гидрофильность метаболита, образованного на первичной стадии фазы I, недостаточна для экскреции с мочой, то продукты этой стадии претерпевают дополнительные модификации в рамках фазы I. Так получают полигидроксированные и комбинированные метаболиты, которые обычно доминируют в метаболических смесях высокогидрофобных ксенобиотиков.

Фаза II метаболизма всегда предполагает усложнение молекулы за счет присоединения высокогидрофильных остатков глюкуроновой (чаще всего) или серной (редко) кислот. Она является дополнительным путем повышения гидрофильности и протекает только в том случае, если молекула субстрата (метаболит фазы I или

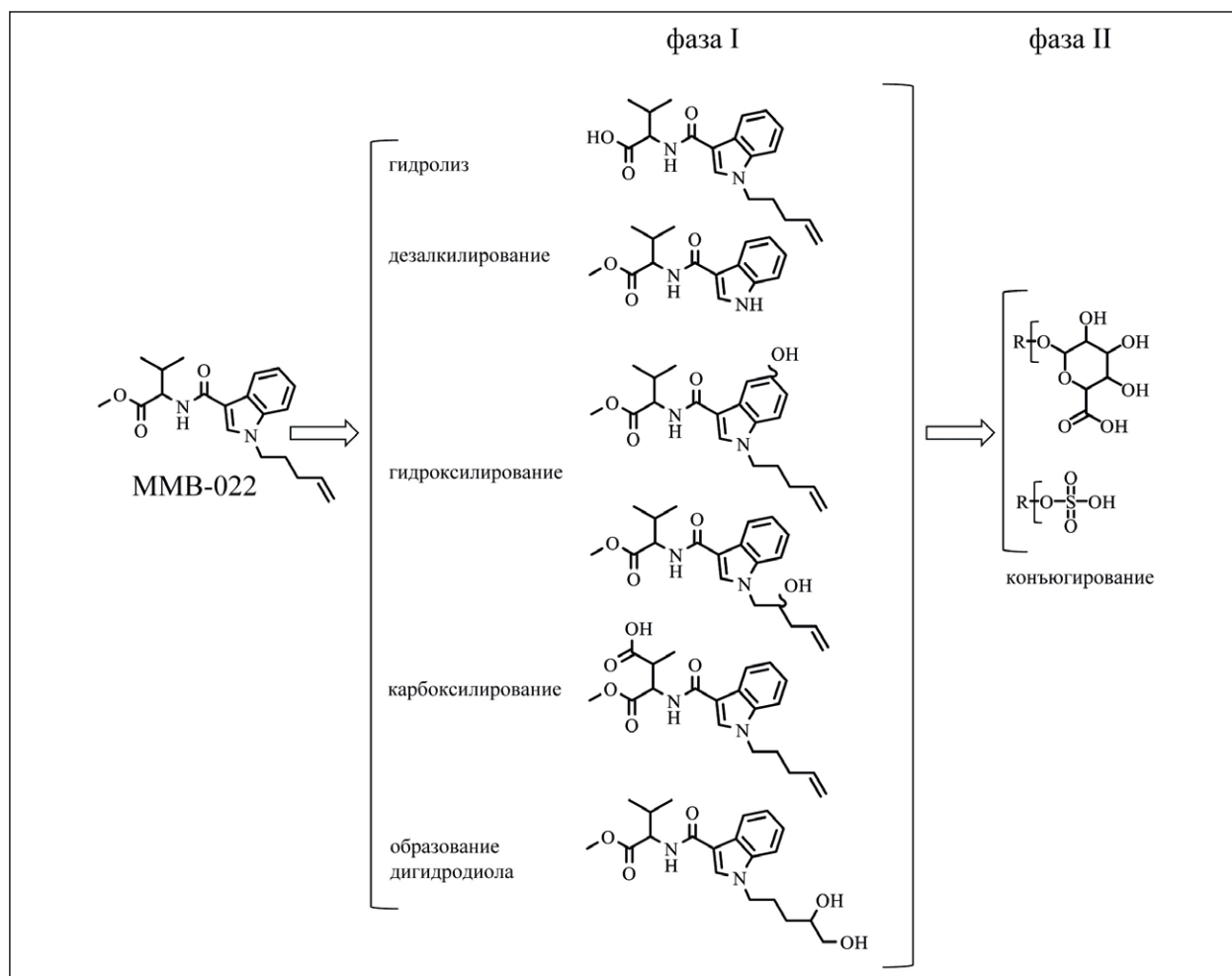


Рисунок 3 – Основные направления метаболизма на примере синтетического каннабиоида MMB-022. Волнистой связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка [5]

исходный ксенобиотик) имеет необходимые функциональные группы, в том числе гидроксильную, карбоксильную или аминогруппу. Тем не менее, в ряде случаев метаболизм проходит с повышением гидрофобности; так, при протекании фазы II возможно образование метилированных или ацетилированных метаболитов.

Как уже отмечалось, виды и количества метаболитов являются особенностью структуры ксенобиотика. В случае гидрофобных структур, к которым относятся как сам тетрагидроканнабинол (психоактивный компонент каннабиса), так и синтетические каннабиноиды, исходное соединение может быть найдено в крови потребителя лишь в течение небольшого времени после употребления [6] и, как правило, отсутствует в моче [7]. Следовательно, аналитические заключения должны быть сделаны по наличию метаболитов, а не исходного вещества.

Подобная ситуация является вынужденной, но отнюдь не редкой и не приводящей

к снижению достоверности заключений, хотя может вести к некоторой неопределенности при установлении исходного вещества. В случае «классических» наркотиков заключение об употреблении тетрагидроканнабинола (ТГК, при курении каннабиса) может быть сделано только по наличию в моче основных метаболитов – 11-нор-9-карбокси-ТГК и его глюкуронида (рисунок 4) [2]. Содержание метаболита 11-гидрокси-ТГК в моче, как правило, очень мало. Поскольку в настоящее время иные способы диагностики употребления каннабиса отсутствуют, то вынесение заключений по наличию метаболитов, а не исходного вещества является общепринятым [8].

Дополнительной сложностью при формировании заключений о результатах анализа следует назвать образование артефактов. Это вещества, формирующиеся самопроизвольно при деградации исходного соединения на любой стадии обращения наркотика – от приема до инструментального анализа. В каче-

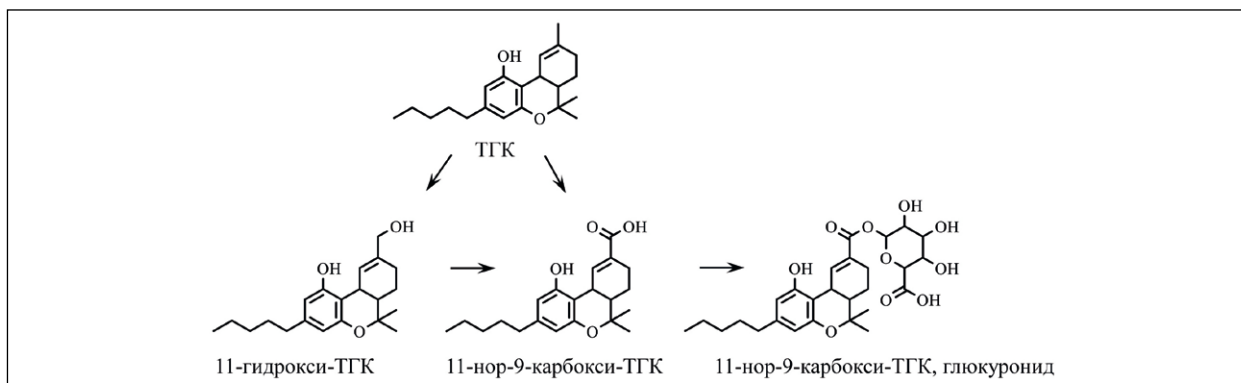


Рисунок 4 – Основные пути метаболизма тетрагидроканнабинола, психоактивного компонента каннабиса [2]

стве примера можно привести термолит тетраметилциклопропанового цикла, входящего в структуру молекул ряда синтетических каннабиноидов (рисунок 5).

В данном случае деградация исходного вещества обусловлена способом приема веществ этого семейства – курением. Как исходное соединение, так и продукт термолита имеют свой набор метаболитов и дополнительных артефактных соединений, образующихся уже в ходе анализа [9].

Особенности обнаружения наркотиков, их метаболитов и артефактов в биологических объектах. Обнаружение наркотиков в изымаемых продуктах, предназначенных для дальнейшего употребления, не представляет серьезных методических затруднений и поэтому не рассматривается. Однако анализ биологических объектов, отбираемых у предполагаемых потребителей наркотиков и имеющих диагностические цели, сложен ввиду малого содержания аналитов, влияния матрицы, метаболизма и образования разнообразных артефактов [10, 11]. Общая схема скрининга биообъектов предполагает наличие двух стадий [2, 12].

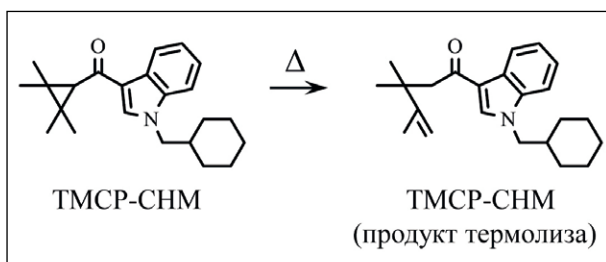


Рисунок 5 – Температурная деградация тетраметилциклопропановых синтетических каннабиноидов [9]

1. Предварительный экспресс-анализ, выполняемый иммунохимическими методами. В большинстве случаев проводится с помощью иммунохимических тест-систем («бумажных полосок»). В России наиболее распространены тест-системы производства НаркоЛаб и ФакторМед^{6,7}. Иммунохимический анализ может выполняться в полевых условиях в течение нескольких минут и дает ответ о вероятном наличии ряда наркотиков и их производных в биообъекте (чаще всего – в моче). Главными недостатками иммунохимического анализа следует назвать недостаточную селективность к структурам аналитов, приводящую к трудноинтерпретируемому и ложноположительным результатам, а также ориентированность лишь на определенные группы веществ. Ввиду медленного обновления иммунохимических систем значительное количество НПВ не обнаруживается. Результат иммунохимического анализа не может быть вынесен в окончательном заключении, а должен быть причиной проведения подтверждающего анализа.

2. Подтверждающий анализ. Выполняется только инструментальными физико-химическими методами, позволяющими достичь высокой чувствительности и достоверности результатов. В настоящее время для этого пригодны только «дефисные» методы, совмещающие возможности разделения смесей и селективного детектирования их компонентов: это газовая и жидкостная хромато-масс-спектрометрия (ГХ-МС и ЖХ-МС). Такое совмещение двух независимых технологий, позволяющее реализовывать обнаружение аналита по двум независимым параметрам – хроматографическому удерживанию и масс-спектру – и есть причина высокой надежности хромато-масс-спектрометрии.

⁶ «ФАКТОР-МЕД». Тесты на наркотические и психотропные вещества. URL: <http://faktor.ru/catalog/category/1> (дата обращения: 03.10.2022).

⁷ Тест-система НаркоЛаб. URL: <http://www.narkolab.ru/category/test-systema-narkolab> (дата обращения: 03.10.2022).

Таблица 1 – Примерные характеристики хроматомасс-спектрометрических методов при определении наркотиков в биообразцах*

| Метод разделения | Тип масс-спектрометра | Приблизительные характеристики аналитов | | | Возможность скрининга | | Особенности | |
|--------------------------|--------------------------------|---|-------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------|------------------|-----------------|
| | | Масса | Полярность | Стабильность | целевой | нецелевой | Чувствительность | Информативность |
| Газовая хроматография | Моноквадрупольный | < 400 | Малая и средняя | Термостабильные аналиты | да | да | Средняя | Высокая |
| | Трехквадрупольный | "_" | "_" | | да | нет | Высокая** | Низкая** |
| | Времяпролетный | "_" | "_" | | | | Средняя | Очень высокая |
| Жидкостная хроматография | Трехквадрупольный | > 100 | Средняя и высокая | Аналиты, стабильные к гидролизу | да | да | Очень высокая** | Низкая** |
| | Ионная ловушка | "_" | "_" | | да | да | Средняя | Высокая |
| | Квадруполь-времяпролетный | "_" | "_" | | да | да | Средняя | Очень высокая |
| | Квадруполь-орбитальная ловушка | "_" | "_" | | да | | Очень высокая | Очень высокая |

Примечание:
* составлена авторами
** в режиме наблюдения ионных переходов

Оба метода – газовый и жидкостной – подразумевают множество модификаций, отличающихся преимущественно процессами разделения (хроматография) и схемами масс-спектрометров (таблица 1) [13–15]. Для нашего рассмотрения наиболее важны характеристики, относящиеся к чувствительности и общей информативности методов. Они могут быть сгруппированы в два основных способа анализа: целевой скрининг [14, 15] и нецелевой скрининг [13, 16–18].

1. Возможности целевого скрининга:

- обнаружение ограниченного (до нескольких сотен) количества веществ;
- высокая чувствительность;
- пониженная достоверность обнаружения;
- невозможность ретроспективной обработки экспериментальных данных.

Следствие: если метод не настроен на обнаружение конкретного аналита, то его присутствие в пробе приведет к ложноотрицательному результату.

Для целевого скрининга используются, в основном, трехквадрупольные масс-спектрометры. Разработка метода обязательно требует наличия стандартных веществ [14].

2. Возможности нецелевого скрининга:

- обнаружение веществ, количество которых ограничено только имеющейся информацией о них (поисковыми библиотеками) и физико-химическими свойствами;
- пониженная чувствительность;

– достоверность обнаружения, зависящая от специфичности масс-спектров;

– возможность ретроспективной обработки экспериментальных данных, позволяющая пересматривать результаты анализа спустя любое время после его выполнения.

Следствие: если содержание аналита в пробе невелико, то вероятность его обнаружения при нецелевом скрининге также мала.

Для нецелевого скрининга используются масс-спектрометры, позволяющие получать расширенную информацию об аналите: ионные ловушки (получение последовательных масс-спектров) [16, 17] и системы высокого разрешения (времяпролетные спектрометры и орбитальные ловушки, позволяющие определять элементный состав молекулы аналита) [18, 19].

Выбор метода разделения между газовой и жидкостной хроматографией зависит не только от общих характеристик аналита, приведенных в таблице 1, но и от его способности ионизироваться при вводе в масс-спектрометр. Для газовой хроматомасс-спектрометрии чаще всего используется электронная ионизация, позволяющая детектировать любые молекулы, попадающие в спектрометр из хроматографической колонки. Для жидкостной хроматомасс-спектрометрии обычно применяются более селективные источники ионизации, что приводит к невозможности детектирования многих – чаще всего малополярных – аналитов. Отсюда следует вывод о комплементарности газовой и жидкостной методов и, следовательно, необхо-

димости совместного применения при анализе смесей неизвестного состава.

Основная проблема обнаружения НПВ и применение поисковых библиотек. Широкие возможности хромато-масс-спектрометрических методов основываются на их высокой селективности. Следовательно, для того, чтобы вещество было обнаружено, необходимо знать его аналитические параметры: хроматографическое удерживание и масс-спектры, пригодные для практического анализа. Такое знание может быть получено тремя путями, формирующими три независимые аналитические стратегии.

1. Наличие стандартного вещества. Эта стратегия наиболее надежна и принята, в частности, в ОЗХО и в допинговом анализе [20, 21]. Однако в России стандартные вещества наркологической тематики крайне труднодоступны. Очень ограниченный набор стандартов «классических» наркотиков (в том числе морфин, фентанил, фенobarбитал, некоторые вещества группы diazepinov) выпускается в ФГУП «Московский эндокринный завод». С расширением ассортимента НПВ изготовлением стандартов как самих наркотиков, так и ряда их метаболитов занялись ряд зарубежных производителей, из которых наиболее известным является Cayman Chemical⁸. Однако ввоз их продукции на территорию РФ невозможен из-за таможенных ограничений. Более того, сайт Cayman Chemical ранее был длительное время блокирован надзорными органами РФ. В сложившейся ситуации в качестве стандартного вещества могут выступать лишь суррогаты в виде биологических образцов, содержащих требуемое вещество согласно некоей сторонней информации.

2. Наличие справочной информации, в том числе поисковых библиотек. Данная стратегия не подразумевает использование стандартных веществ, а ее достоверность базируется на специфичности масс-спектров и опыте оператора-аналитика [22, 23]. Использование поисковых библиотек актуализировано как ускоренным обновлением ассортимента НПВ, так и необхо-

димостью быстрой диагностики при скрининге биообъектов пациентов, поступающих в больницы с симптомами острого отравления. Следующие библиотеки используются наиболее часто при скрининге на наркотики.

2.1. Библиотека, выпускаемая Американским национальным бюро стандартов (NIST)⁹. Обширная библиотека, ценность которой сильно ограничена из-за редкой обновляемости и ограниченности информации о метаболитах.

2.2. Библиотека дизайнерских наркотиков, формируемая Питером Рёсснером (Peter Rösner)¹⁰. Период обновлений – около 2 лет. Содержит, в основном, характеристики исходных соединений.

2.3. Токсикологическая библиотека группы Ханса Маурера (Hans Maurer)¹¹. Наиболее полная библиотека, включающая как исходные соединения, так и их метаболиты, и производные. В настоящее время является основным справочным инструментом в области аналитической токсикологии.

2.4. Библиотека информационной системы АИПСИН¹², выпускаемая белорусскими разработчиками и в настоящее время находящаяся под российской юрисдикцией. Является быстрообновляемым и высокопрофессиональным изделием, прошедшим длительную апробацию в лабораториях Министерства внутренних дел России и ряда иных ведомств. К недостаткам можно отнести неполную информацию о метаболитах.

2.5. Бесплатная библиотека СУДМЕД-МС (SUDMED-MS), формируемая на общественных началах российским профессиональным сообществом¹³. Быстро обновляемая и весьма полная библиотека, главным недостатком которой является неполная выверенность масс-спектров.

В условиях современной международной обстановки при обнаружении НПВ актуальны лишь российские библиотеки.

3. Проведение работ по структурной идентификации НПВ и их метаболитов.

3.1. Исходные (неизмененные) НПВ. Базовые работы, проводимые при изъятии

⁸ Cayman Chemical. 1180 East Ellsworth Road. Ann Arbor, Michigan 48108 USA. URL: <https://www.caymanchem.com/> (дата обращения: 03.10.2022).

⁹ CHEMDATA.NIST.GOV. Mass Spectrometry Data Center. URL: <https://chemdata.nist.gov/dokuwiki/doku.php?id=chemdata:start> (дата обращения: 03.10.2022).

¹⁰ URL: <https://sciencesolutions.wiley.com/wp-content/uploads/2022/05/Wiley-Mass-Spectra-of-Designer-Drugs-Datasheet.pdf> (<https://sciencesolutions.wiley.com/solutions/technique/gc-ms/mass-spectra-of-designer-drugs/>) (дата обращения: 03.10.2022).

¹¹ URL: <https://sciencesolutions.wiley.com/wp-content/uploads/2018/05/MPW-5e-Sell-Sheet.pdf> (<https://sciencesolutions.wiley.com/solutions/technique/gc-ms/mass-spectral-library-of-drugs-poisons-pesticides-pollutants-and-their-metabolites-5th-edition/>) (дата обращения: 03.10.2022).

¹² AIP SIN WEB. URL: <https://aip sin.com/information/> (дата обращения: 03.10.2022).

¹³ SUDMED MASS SPECTRA. Non-commercial MS-EI Library of Russian Professional Community. URL: <https://sudmed-ms.ru/> (дата обращения: 03.10.2022).

ранее неизвестного НПВ, обязательно включают стандартные процедуры, принятые для структурной идентификации нового соединения, и проводятся, как правило, в экспертно-криминалистических центрах Министерства внутренних дел. Также, как правило, для структурной идентификации не используется выполнение встречного синтеза, особенно для тех НПВ, которые попадают под действие законодательных ограничений. Получаемые характеристики НПВ (в первую очередь, газовые масс-спектры) чаще всего вводятся в базу данных системы АИПСИН для последующей публикации. Только после этого поиск данного НПВ может осуществляться региональными лабораториями Минздрава. Однако следует заметить, что данный канал публикации спектров не является следствием работы государственной организации, а существует только благодаря коммерческой деятельности сотрудников АИПСИН. Дополнительным источником данных о НПВ могут быть масс-спектры, прецедентно записанные в региональных лабораториях Минздрава и распространяемые через АИПСИН или СУДМЕД-МС. Однако достоверность этих данных обычно существенно ниже ввиду отсутствия процедуры идентификации.

3.2. Метаболиты НПВ. Как отмечено выше, многие НПВ подвержены экстенсивному метаболизму и поэтому отсутствуют в биообъектах. В этом случае характеристики исходного вещества (даже если они доступны) не помогут сделать заключение о возможном употреблении НПВ. Следовательно, необходимо проведение работ по структурной идентификации метаболитов. Эта процедура весьма специфична ввиду разнообразия метаболических путей, малого содержания продуктов метаболизма в биообъектах и частого наличия богатых матриц. Она может включать (но не ограничиваться) следующими пунктами [9, 24]:

- генерация метаболитов *in vitro* ферментацией исходного соединения на гепатоцитах (живых клетках человеческой печени) или на печеночных фракциях, содержащих активные ферментные системы;
- генерация метаболитов *in vivo* с использованием лабораторных животных;
- поиск биообъектов потребителей НПВ, поскольку только так можно получить метаболические смеси, характерные для человека;
- обнаружение и структурная идентификация метаболитов исключительно методами газовой и жидкостной хроматомасс-спектрометрии и химических модификаций;
- выбор метаболитов, наиболее удобных для практического обнаружения;
- уверенная дифференциация найденных веществ от соединений матрицы;

- статистически значимая выборка человеческих биообразцов (моча, кровь);

- распространение полученной информации через общедоступные библиотеки.

Следует отметить, что обнаружение метаболитов (тем более, вместе с исходным соединением) значительно повышает достоверность заключений, поскольку элиминирует риск возможного загрязнения и фальсификации проб.

В настоящее время в России отсутствуют государственные или частные организации, штатно занятые решением подобных задач, исключая редкие научно-исследовательские разработки некоторых организаций. Однако эти разработки носят крайне ограниченный характер и не предусматривают выполнения большинства перечисленных пунктов.

Отдельные семейства НПВ

Стимуляторы. Два семейства в сумме составляют самую многочисленную группу НПВ (268 веществ, формально зарегистрированных EMCDDA с 2005 г). Оба семейства объединены по структурным признакам, в основе которых лежит фенэтиламиновое ядро, как показано на рисунке 6. Родоначальники семейств имеют разное происхождение: амфетамин синтезирован в конце XIX века, катинон является психоактивным компонентом кустарника ката (*Catha edulis*). В целом фенэтиламины и катиноны оказывают стимулирующее и галлюциногенное действие, причем оно связано с модификацией обмена допамина, норэпинефрина и серотонина, выполняющих функции нейротрансмиттеров [25, 26]. Употребление стимуляторов носит, в основном, развлекательный (рекреационный, клубный) характер, что, по-видимому, явилось важным побудительным мотивом для синтеза новых веществ. Так, множество психоактивных производных фенэтиламина было синтезировано и испытано американцем русского происхождения Александром Шульгиным (А. Shulgun; 1925–2014), активно пропагандирующим употребление стимуляторов и галлюциногенов в своей книге, написанной в соавторстве с супругой «Фенэтиламины, которые я знал и любил: химическая история любви». Часть книги, содержащая синтетические прописи, запрещена в РФ.

В России наиболее распространены по крайней мере три стимулятора: метилendioксиметамфетамин (МДМА), мефедрон и α -пирролидиновалерофенон (α -PVP) (рисунк 6), причем употребление двух последних носит массовый характер. Все три вещества можно лишь условно назвать «новыми», поскольку впервые они были синтезированы в начале и в середине XX века (мефедрон – в 1929 г. [25]). По-видимому, именно

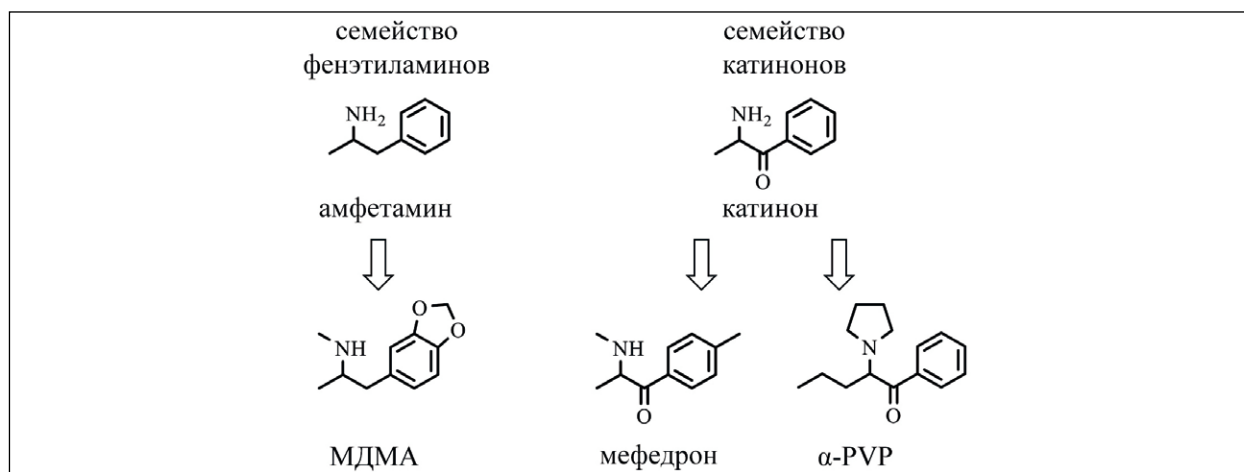


Рисунок 6 – Родоначальники семейств фенэтиламинов и катинонов и их производные, наиболее часто встречающиеся в России (составлено авторами)

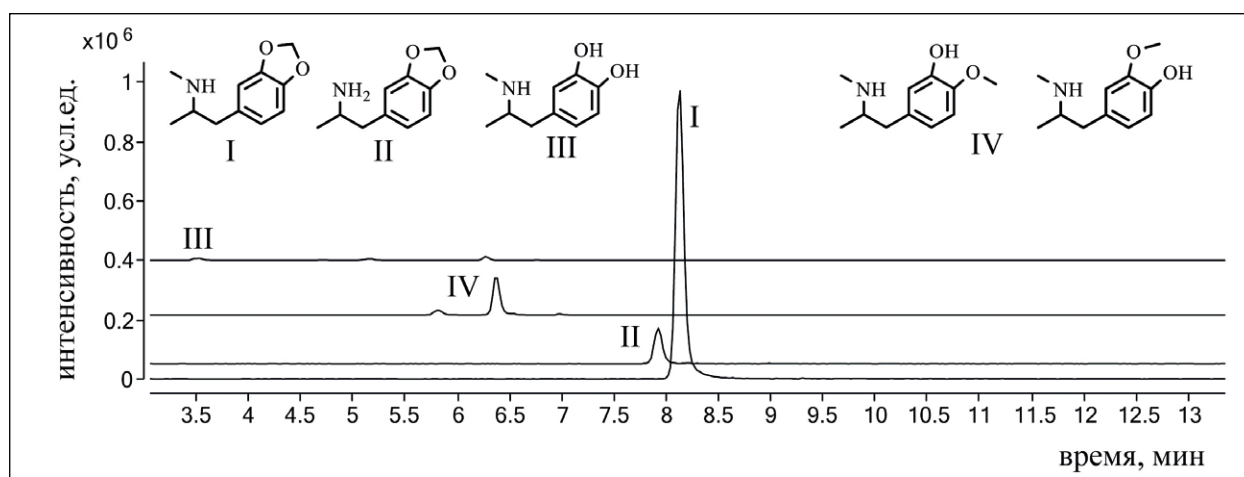


Рисунок 7 – ЖХ-МС хроматограмма мочи потребителя МДМА (I). Метаболиты: II – деметилированный; III – деметиленированный; IV – деметилированные метилированные (данные авторов, ранее не публиковались)

мефедрон и α-пирролидиновалерофенон являются самыми распространенными наркотиками в России, если не принимать во внимание каннабис. Перечисленные стимуляторы чаще всего принимают орально и интраназально, дозировка зависит от способа приема и составляет от единиц до десятков миллиграмм (α-PVP) и от десятков до сотен миллиграмм (МДМА, мефедрон). Зафиксированы случаи передозировки с летальным исходом [25–27].

Все три соединения метаболизируются в организме. Для МДМА, как и для других производных амфетамина (катинона) с бензодиксольным остатком, характерно раскрытие пятичленного цикла, причем последующее образование метилированных метаболитов следует отнести к фазе II метаболизма (рисунок 7). Обычно пики таких метаболитов весьма интенсивны.

Как отмечалось выше, α-PVP весьма распространен в России и нередко встречается в биообразцах вместе с другими наркотиками (чаще всего семейства опиоидов). α-PVP экстенсивно метаболизируется, и содержание метаболитов в моче относительно исходного вещества зависит от времени, прошедшего от приема вещества до отбора мочи. Если это время значительно (несколько суток), то доля исходного соединения очень мала, поэтому заключение следует выдавать по наличию метаболитов. Основные пути метаболизма α-PVP заключаются в восстановлении кетогруппы до спирта и раскрытие пирролидинового цикла с окислительным дезаминированием (рисунок 8).

Важнейшим метаболитом мефедрона является продукт его карбоксилирования (рисунок 9), что согласуется с результатами опубликованных работ [28]. В отличие от α-PVP, содержание восстановленного метаболита

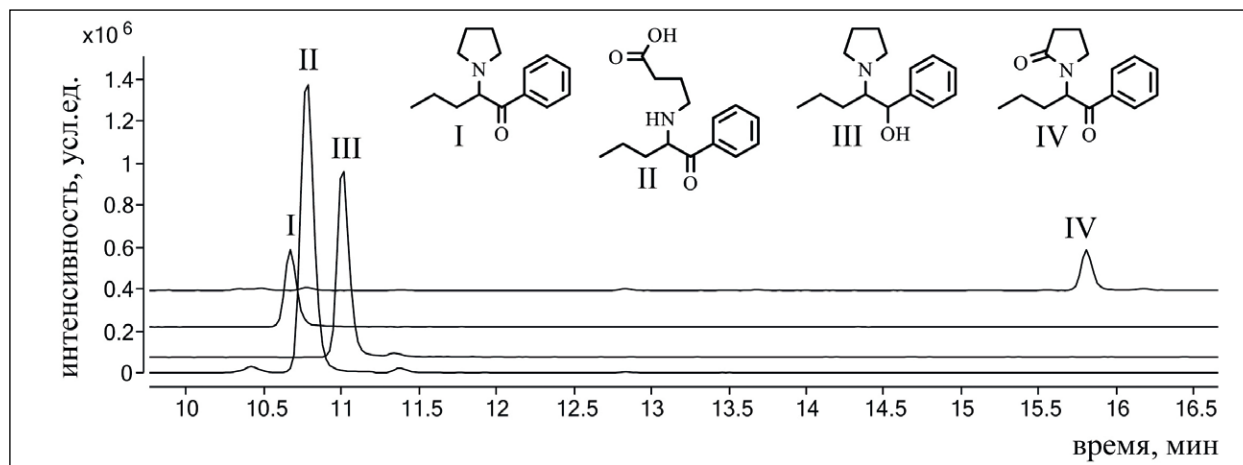


Рисунок 8 – ЖХ-МС хроматограмма мочи потребителя α-PVP (I). Метаболиты: II – дезаминированный карбоксилированный; III – восстановленный; IV – амидированный [26]

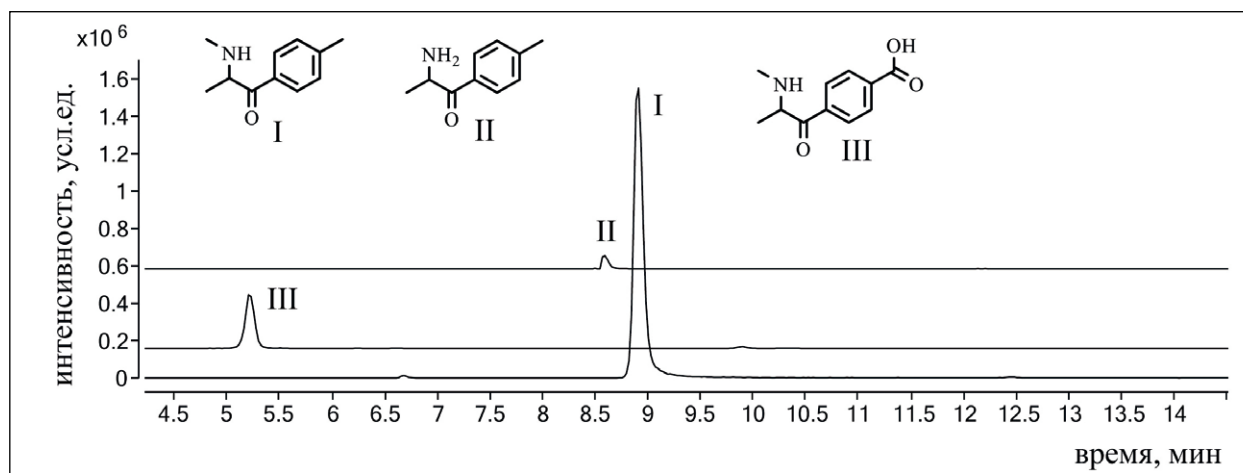


Рисунок 9 – ЖХ-МС хроматограмма мочи потребителя мефедрона (I). Метаболиты: II – деметилированный; III – карбоксилированный (данные авторов, ранее не публиковались)

невелико. N-деметилирование также следует признать малоинтенсивным направлением метаболизма.

Кроме перечисленных соединений, в России распространяются и другие вещества семейств фенэтиламина и катинонов, являющиеся производными и гомологами МДМА и α-PVP [29, 30].

Синтетические каннабиноиды. Синтетические каннабиноиды (СК) – наиболее структурно-вариабельная группа НПВ (рисунок 10), поэтому она объединена по признаку фармакологического действия. Все СК являются активными по отношению к каннабиноидным рецепторам человека CB1 и CB2 и обязательно являются агонистами CB1, расположенного в центральной нервной системе. С 2005 г. EMCDDA зарегистрировала 224 СК и, следовательно, это семейство доминирует по численности. Ни один из распространяемых СК (как и тетрагидроканнабиол – психоактивный

компонент каннабиса) не имеет значительного структурного сходства с анандамидом – эндогенным каннабиноидом человека.

Очень большое количество СК было синтезировано ранее в процессе работ по исследованию каннабиноидной системы человека и поиску безопасных заместителей тетрагидроканнабинола [31, 32]. Однако только немногие из них примерно с 2008 г. стали появляться на рынках психоактивных веществ, и с середины 2010-х гг. рынок стал наполняться новыми, неизвестными ранее веществами. Обычная дозировка СК составляет единицы миллиграмм, способ потребления – исключительно ингаляционный (курение).

До недавнего времени большинство СК имели сходную структуру, состоящую из индольного или индазольного ядра, карбоксамидной цепи в 3-м положении и алкильного (арилалкильного) заместителя у атома азота, подобно ADB-BUTINACA или MDMB-4en-PINACA. В

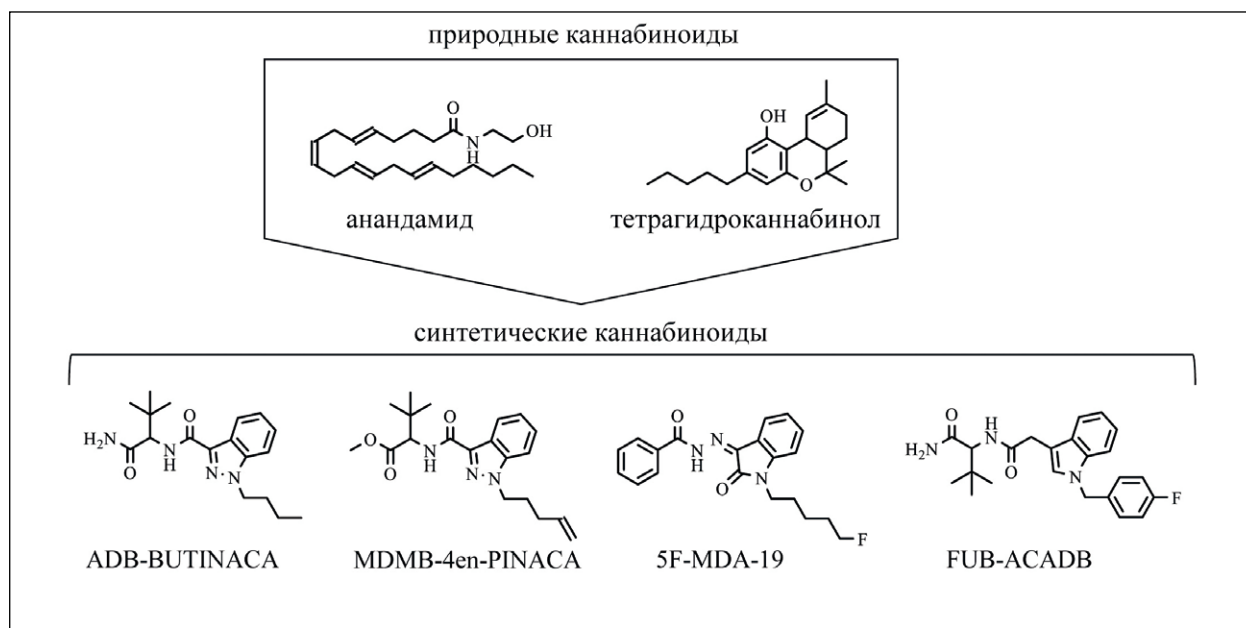


Рисунок 10 – Природные и некоторые синтетические каннабиноиды, встречающиеся в России (составлено авторами)

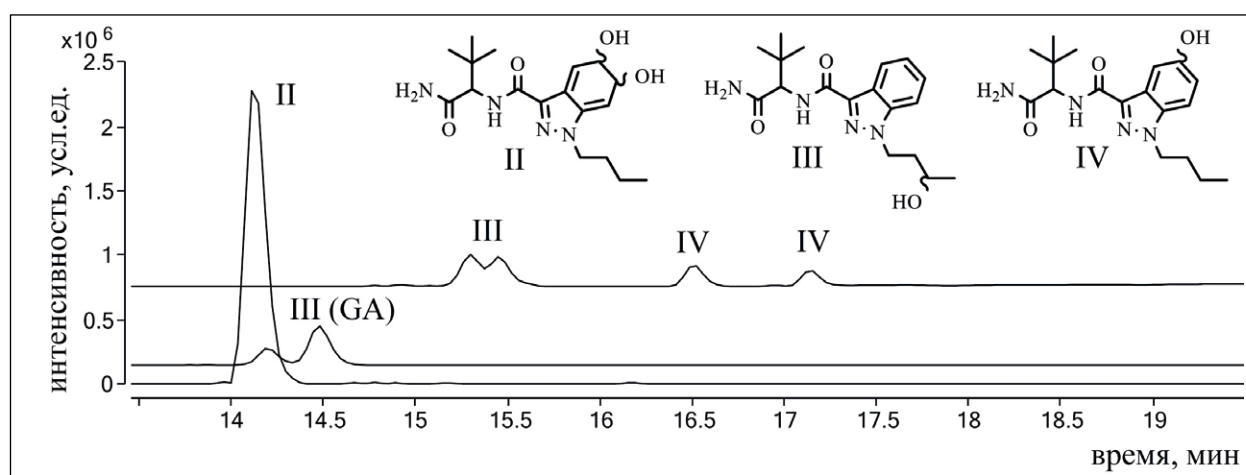


Рисунок 11 – ЖХ-МС хроматограммы мочи потребителя ADB-BUTINACA. Волнистой связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка. Метаболиты: II – дигидродиол; III – гидроксильированный по боковой цепи; IV – гидроксильированный по индазольному остатку. GA – глюкуронид [35]

настоящее время разнообразие структур возросло (например, 5F-MDA-19 и FUB-ACADB) [33, 34]. Метаболиты только первых двух веществ авторы настоящей работы наблюдали в биообъектах человека (рисунки 11 и 12), метаболизм двух других СК исследовали методом *in vitro*.

Наиболее интенсивный пик на хроматограмме мочи принадлежит дигидродиолу. Интенсивность пиков остальных метаболитов значительно меньше. Такое распределение метаболических путей можно считать особенно для ADB-BUTINACA.

MDMB-4en-PINACA – сложный эфир, и основным направлением его метаболизма, как

отмечалось выше, является гидролиз. Большинство остальных метаболитов образованы трансформацией продукта гидролиза, причем основной вклад в их образование вносит боковая пентильная цепь. Образующийся дигидродиол по двойной связи боковой цепи и продукты дигидроксилирования боковой цепи формируют наиболее интенсивные пики на хроматограмме.

Синтетические опиоиды. Синтетические опиоиды в группе НПВ – сравнительно небольшое семейство (73 соединения, зарегистрированные EMCDDA), представляющее особую опасность, как минимум, ввиду формирования физической

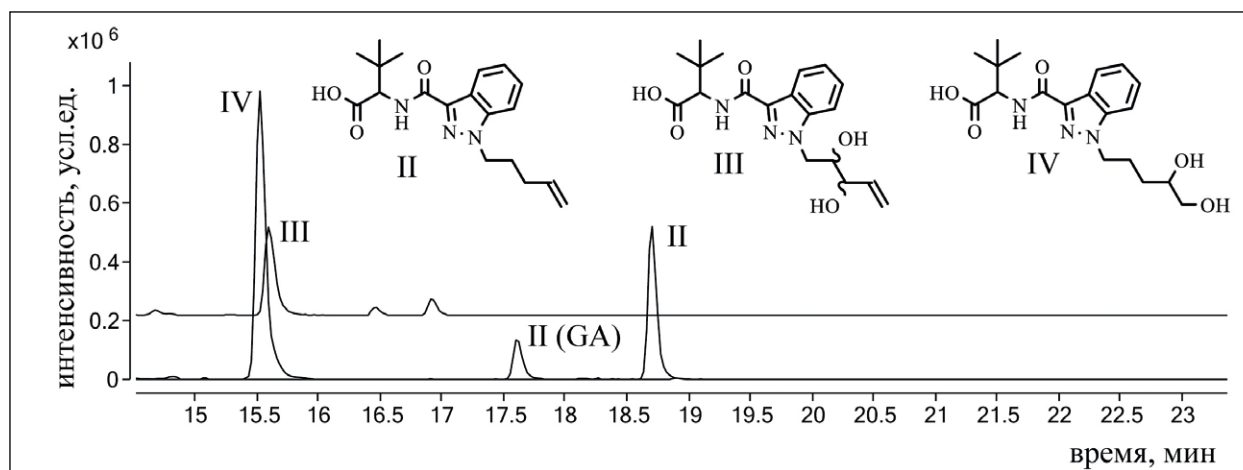


Рисунок 12 – ЖХ-МС хроматограммы мочи потребителя MDMB-4en-PINACA. Волнистой связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка. Метаболиты: II – гидролизированный; III – гидролизированный дигидроксилированный; IV – дигидродиол. GA – глюкуронид (данные авторов, ранее не публиковались)

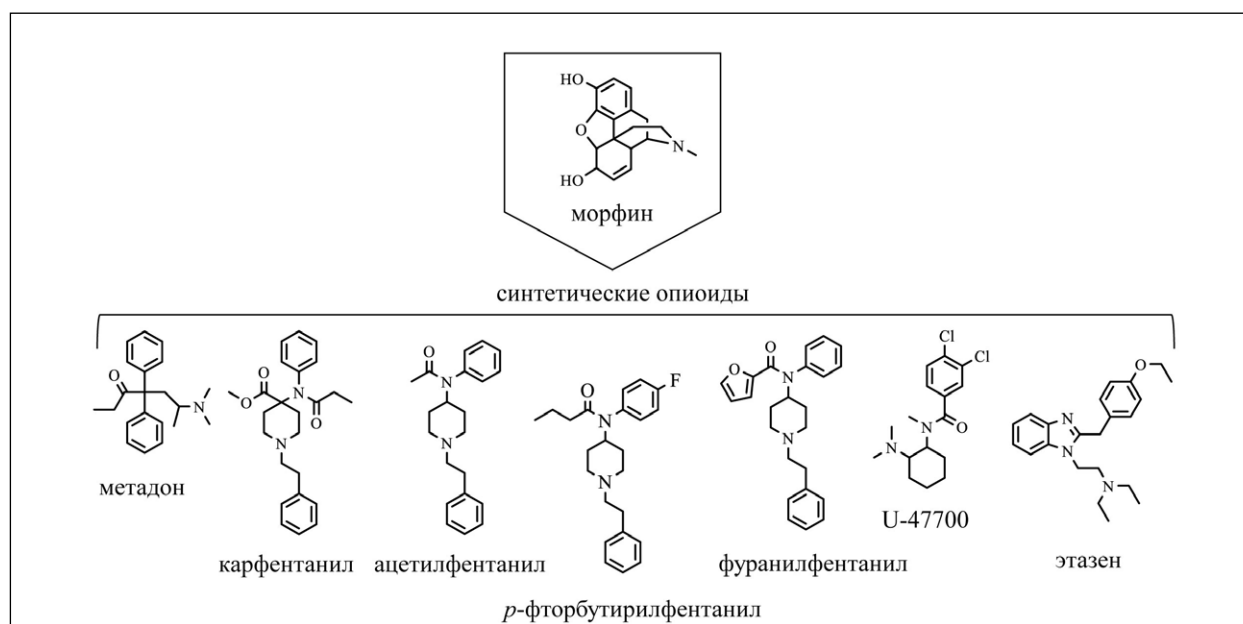


Рисунок 13 – Природные и некоторые синтетические опиоиды, встречающиеся в России (составлено авторами)

зависимости, в связи с чем рассматриваемое как «тяжелые» наркотики. Пять соединений из приведенных на рисунке 13 можно отнести к НПВ (ацетилфентанил, *p*-фторбутирилфентанил, фуранилфентанил, U-47700 и этазен). Подобно СК, синтетические опиоиды структурно разнообразны и выделены в отдельное семейство по признаку активности по отношению к μ -опиоидным рецепторам человека.

В РФ запрещен оборот метадона (вещество внесено в Список I), однако это вещество позиционируется рядом государств как лекарство-заместитель при лечении опиатной (героиновой) зависимости. Это облегчает доступ-

ность метадона. В 2000–2010 гг. в большинстве нестоличных регионов России частота обнаружения метадона была невысокой. Впоследствии употребление метадона значительно увеличилось, в первую очередь в Московской области. В настоящее время метадон распространен почти повсеместно и чаще всего встречается в трупных объектах, исследуемых в рамках судебно-химических исследований.

Группа фентанилов крайне опасна ввиду очень высокой активности (в сотни и тысячи раз выше морфина) и малого фармакологического диапазона [36, 37]. Данное сочетание часто приводит к передозировке, особенно

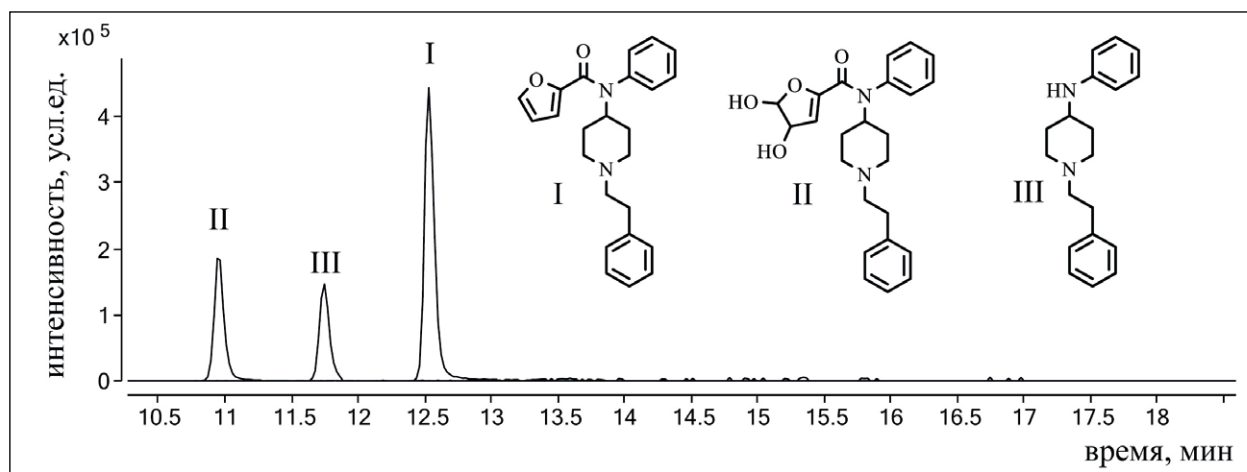


Рисунок 14 – ЖХ-МС хроматограммы мочи потребителя фуранилфентанила (I).
 Метаболиты: II – дигидродиол; III – гидролизированный [39]

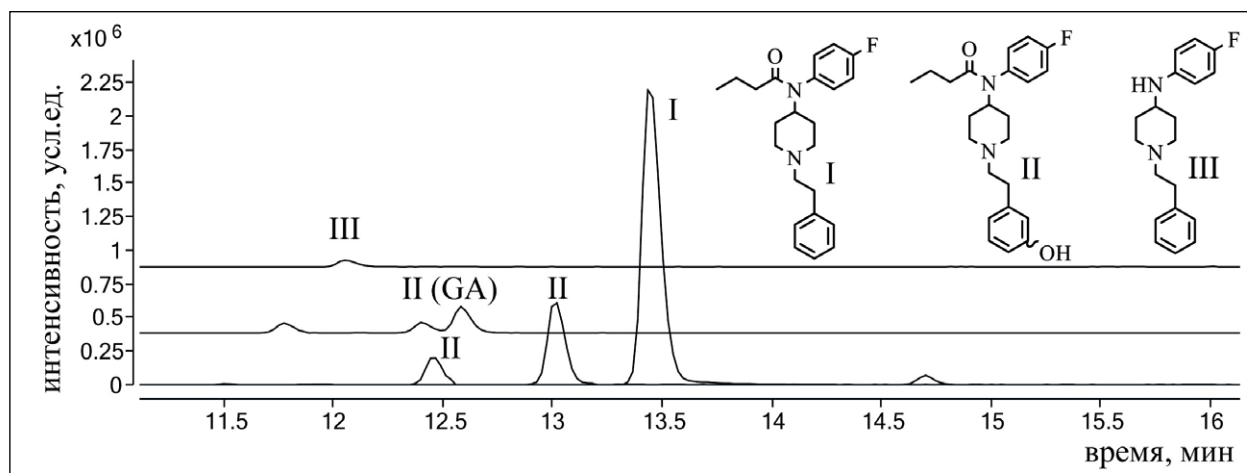


Рисунок 15 – ЖХ-МС хроматограммы мочи потребителя р-фторбутирилфентанила (I). Волнистой
 связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка.
 Метаболиты: II – гидроксильированный; III – гидролизированный.
 GA – глюкуронид (данные авторов, ранее не публиковались)

при поставках фентанилов в смеси с неактивным (или малоактивным) наполнителем в виде плохо перемешанных порошков [37, 38]. Обнаружение фентанилов в биологических образцах весьма затруднено ввиду очень малого содержания, поэтому проведение нецелевого скрининга часто ведет к получению ложноотрицательных результатов.

Метаболизм фентанилов в значительной степени определяется особенностями структуры. Несмотря на то, что карфентанил является сложным эфиром, его гидролизированные метаболиты не были нами найдены в десятках анализированных нами образцах мочи или присутствовали в виде следов [38]. Метаболизм фуранилфентанила, вначале изученный при экспозиции крыс, сопровождается, в основном, образованием дигидродиола по двойной связи фуранового цикла и гидролизом амидной

связи (рисунок 14). Впоследствии сам фуранилфентанил и его метаболиты были найдены в трупных биообъектах [39]. Метаболизм ацетилфентанила у человека заключается в гидролизе, N-деалкилировании и гидроксильровании; метаболизм р-фторбутирилфентанила – в гидроксильровании (данные не опубликованы).

По сведениям авторов настоящей работы, U-47700 – вещество, сравнительно редко встречающееся в России. При метаболизме р-фторбутирилфентанила образуются гидролизированный и гидроксильрованные продукты; конъюгирование (вклад фазы II метаболизма) невысок (рисунок 15).

Вещества, структурно-подобные этазену, были весьма распространены в Соединенных Штатах. Этазен изымался в России, по крайней мере, однократно. Высокая гидрофобность этазена ведет к экстенсивному метаболизму (ри-

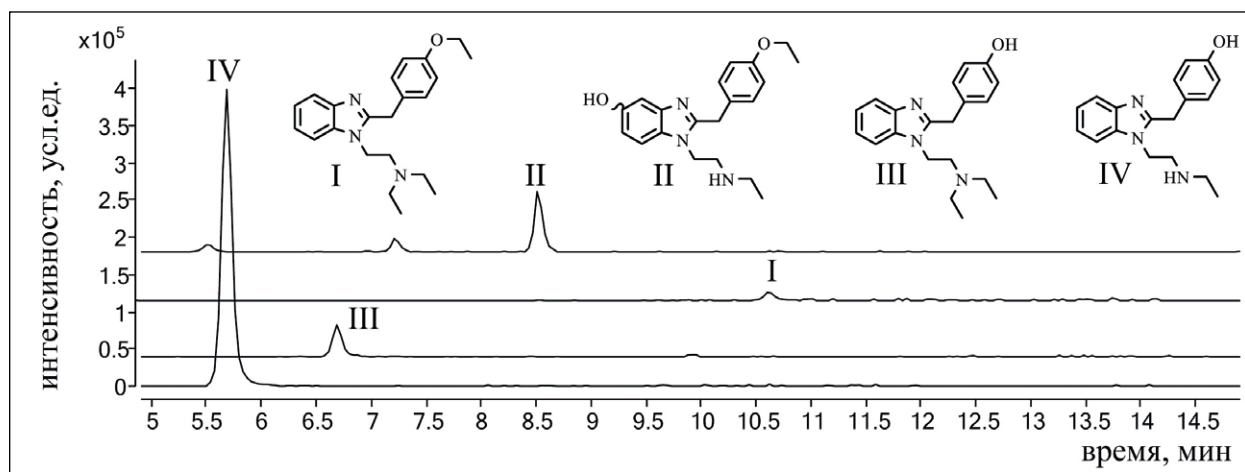


Рисунок 16 – ЖХ-МС хроматограммы мочи крысы, экспонированной этазеном (I). Волнистой связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка. Метаболиты: II – гидроксильированный дезэтилированный; III – дезэтилированный, IV – ди-дезэтилированный [24]

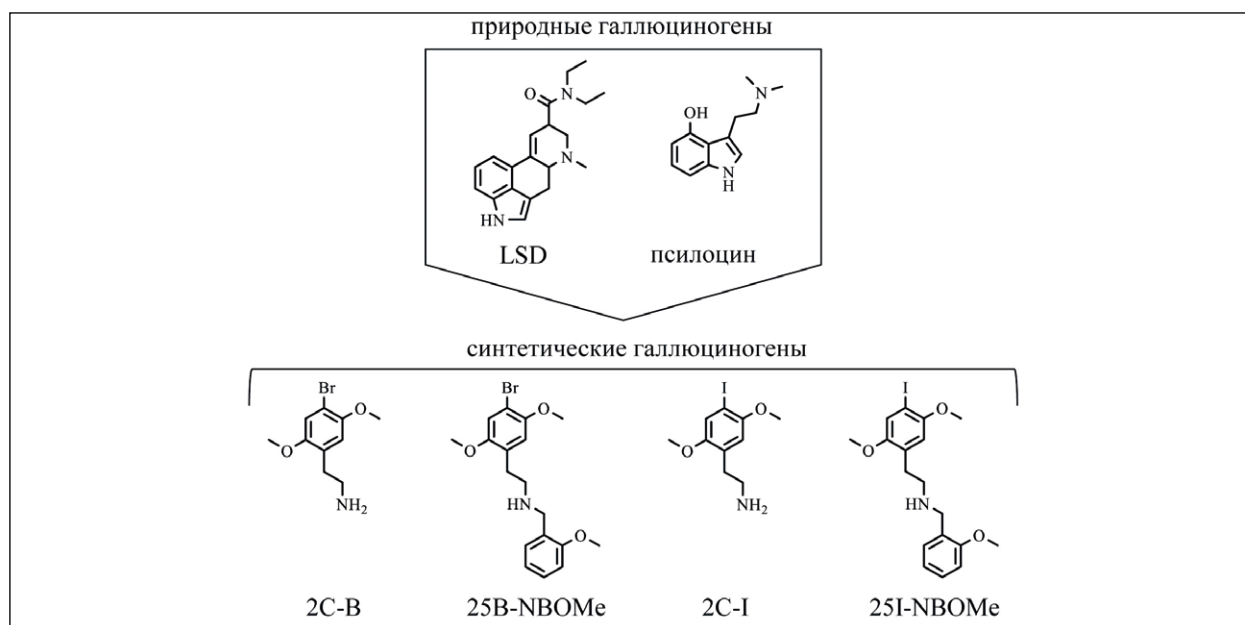


Рисунок 17 – Природные и некоторые синтетические галлюциногены, встречающиеся в России (составлено авторами)

суюнок 16). В целом, метаболизм крыс обычно более интенсивен, чем человеческий. Однако полученное содержание метаболитов по отношению к исходному соединению качественно согласуется с результатами исследования потребителей родственного вещества – изонитезена [40].

Галлюциногены. Галлюциногенные вещества затруднительно классифицировать по структурным признакам. Так, природные галлюциногены (LSD и псилоцин) следовало бы отнести к триптамину, в то время как синтетические продукты (например, 2C-B, 2C-I, 25B-NBOMe, 25I-NBOMe, рисунок 17) являются производными фенэтиламина, уже рассмо-

тренными выше. Однако все они влияют на функционирование серотониновой системы человека и могут являться аффинными лигандами серотонинового рецептора 5-HT_{2A} [41, 42]. Галлюциногенной активностью обладают многие соединения семейства фенэтиламина, и пути повышения разнообразия структур обычно заключаются в замене заместителей и их положения при сохранении общего фенэтиламинового ядра. Синтез и психоактивные свойства легких соединений (группы 2C) описаны в цитированной выше книге А. Шульгина, в то время как более тяжелые соединения (группа NBOMe), по-видимому, были синтезированы при проведении работ по поиску аф-

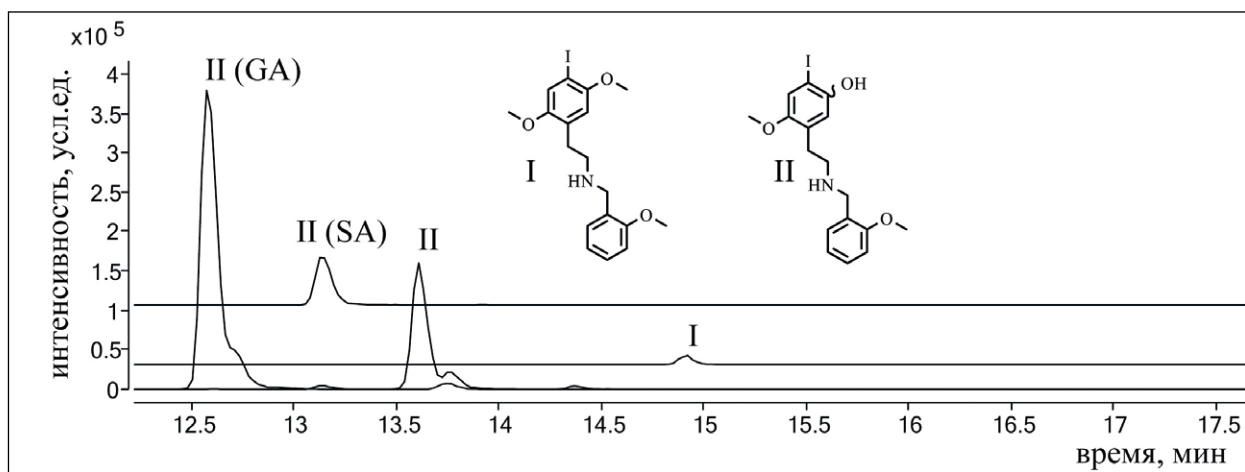


Рисунок 18 – ЖХ-МС хроматограммы мочи потребителя 25I-NBOMe (I). Волнистой связью обозначено неопределенное положение гидроксильной группы в пределах остатка. Метаболит: II – деметилированный. GA – глюкуронид, SA – сульфат [44]

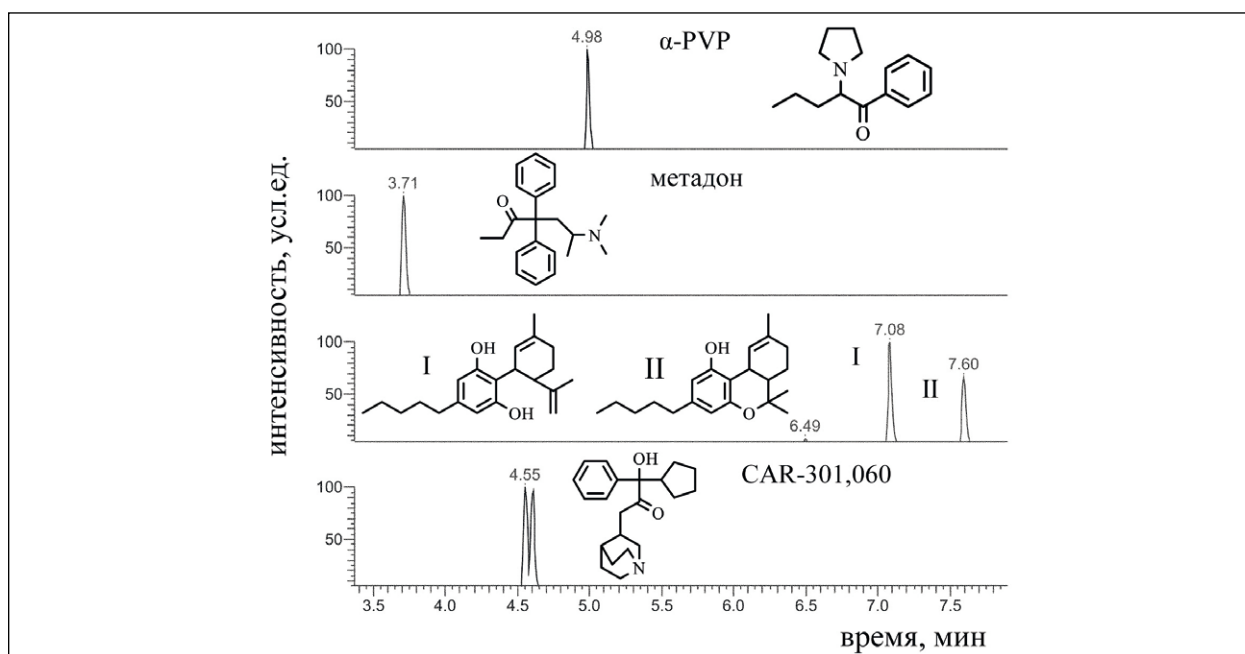


Рисунок 19 – Хроматограммы спиртосодержащей жидкости. I – каннабидиол; II – тетрагидроканнабиол (данные авторов)

финных лигандов рецептора 5-HT_{2A} в начале нового века.

Соединения группы NBOMe встречались в биообъектах значительно чаще, нежели 2C, и ранее позиционировались как «легальная замена» запрещенному LSD. Дозировка NBOMe невелика и составляет примерно от десятков до сотен микрограмм [43, 44].

Соединения группы NBOMe экстенсивно метаболизируются в организме, и содержание исходных веществ обычно очень невелико (рисунок 18). Основными направлениями метаболизма фазы I найдены моно- и ди-О-деметилирование. Гидроксилирование наблюдали

также, но пики соответствующих метаболитов малоинтенсивны. Продукты метаболизма фазы I большей частью конъюгированы глюкуроновой и (в меньшей степени) серной кислотами.

Анализ объектов, доставленных с территории Украины. В зоне проведения специальной военной операции на Украине, на оставленных военнослужащими позициях, часто обнаруживаются объекты, свидетельствующие об употреблении боевиками психоактивных веществ. Многочисленные факты таких обнаружений позволяют сделать вывод о том, что командование вооруженных формирований Украины целенаправленно накачи-

вает своих подопечных наркотиками и различными психостимуляторами с целью создания «универсального солдата». Об отдаленных последствиях употребления таких веществ украинское командование, вероятно, не думает.

Так, в качестве примера приведем лишь три объекта, обнаруженных на позициях и доставленных для анализа.

1. Белый кристаллический порошок, в котором идентифицированы метадон (список I) и димедрол. Подобные смеси распространяются и на территории России и, по сведению авторов, нередко встречались в крупных объектах.

2. Серый кристаллический порошок, в котором обнаружены амфетамин (список I), метамфетамин (список I) и кофеин.

3. Спиртосодержащие жидкости, в которых был обнаружен «коктейль», состоящий из трех наркотиков: α -PVP (список I), метадона (список I) и тетрагидроканнабинола (список I) (рисунок 19). Кроме того, в этих образцах было найдено значительное количество малоизвестного вещества, сведения о котором отсутствовали в обычно используемых масс-спектро-

метрических библиотеках. В дальнейшем оно было идентифицировано как психотомиметик SAR-301,060, синтезированный в 1960-х гг. в Эджвудском арсенале [45]. Найденное вещество является структурным и фармакологическим подобием BZ, включенного в Список II Приложения по химикатам Конвенции о запрещении химического оружия.

Заключение. Обнаружение психоактивных веществ и их маркеров (метаболитов и артефактов) в биомедицинских объектах осложнено рядом факторов. В их число входит малое содержание аналитов в объектах, что справедливо для производных фентанила, синтетических каннабиноидов и ряда галлюциногенов. Однако основные затруднения следует отнести к появлению новых веществ, их структурному разнообразию, метаболизму и крайней ограниченностью любых сведений об аналитических характеристиках. Последнее требует проведения время- и трудозатратных работ по структурной идентификации, которые, в свою очередь, возможны только при наличии достаточно представительных образцов.

Вклад авторов/Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи. / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Финансирование. Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации.

Список источников / References

1. Симонов Е.А., Найденова Л.Ф., Ворнаков С.А. Наркотические средства и психотропные вещества, контролируемые на территории Российской Федерации. М.: «InterLab», 2003. 413 с.

Simonov E.A., Naydenova L.F., Vornakov S.A. Narcotic drugs and psychotropic substances controlled on the territory of the Russian Federation. Moscow: «InterLab», 2003. 413 p. (in Russian).

2. Еремин С.К., Изотов Б.Н., Веселовская Н.В. Анализ наркотических средств. М.: «Мысль», 1993. 272 с.

Eremin S.K., Izotov B.N., Veselovskaya N.V. Analysis of drugs. Moscow: «Mysl», 1993. 272 p. (in Russian).

3. Граник В.Г. Метаболизм экзогенных соединений. М.: «Вузовская книга», 2015. 526 с.

Granik V.G. Metabolism of exogenous compounds. Moscow: «Vuzovskaya Kniga», 2015. 526 p. (in Russian).

4. Smith D., van de Waterbeemd H., Walker D.K. Pharmacokinetics and metabolism in drug design. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001. 141 p.

5. Григорьев А.М., Крупина Н.А., Никитин Е.В. и др. Исследование метаболизма нового синтетического каннабиноида ММВ-022 в моделях *in vivo* и *in vitro* методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии // Масс-спектрометрия. 2020. Т. 17. № 3. С. 151–161. <https://doi.org/10.25703/MS.2020.17.33>

Grigoryev A.M., Krupina N.A., Nikitin E.V. et al. Study of the metabolism of the new synthetic cannabinoid MMB-022 in *in vivo* and *in vitro* models

by liquid chromatography-mass spectrometry // *Mass Spectrometry*. 2020. V. 17. № 3. P. 151–161. (in Russian). <https://doi.org/10.25703/MS.2020.17.33>

6. Teske J., Weller J.P., Fieguth A. et al. Sensitive and rapid quantification of the cannabinoid receptor agonist naphthalen-1-yl-(1-pentylindol-3-yl)methanone (JWH-018) in human serum by liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *J. Chromatogr. B*. 2010. V. 878. P. 2959–2663.

7. Grigoryev A., Savchuk S., Melnik A. et al. Chromatography-mass spectrometry studies on the metabolism of synthetic cannabinoids JWH-018 and JWH-073, psychoactive components of smoking mixtures // *J. Chromatogr. B*. 2011. V. 879. P. 1126.

8. Brenneisen R., Meyer P., Chtioui H. et al. Plasma and urine profiles of Δ^9 -tetrahydrocannabinol and its metabolites 11-hydroxy- Δ^9 -tetrahydrocannabinol and 11-nor-9-carboxy- Δ^9 -tetrahydrocannabinol after cannabis smoking by male volunteers to estimate recent consumption by athletes // *Anal. Bioanal. Chem.* 2010. V. 396. P. 2493–2502.

9. Grigoryev A., Kavanagh P., Labutin A. et al. Tentative identification of the metabolites of (1-(cyclohexylmethyl)-1H-indol-3-yl)-(2,2,3,3-tetramethylcyclopropyl)methanone, and the product of its thermal degradation, by *in vitro* and *in vivo* methods // *Drug Test Anal.* 2019. V. 11. № 9. P. 1387–1402. <https://doi.org/10.1002/dta.2668>

10. Темердашев А.З., Григорьев А.М., Рыбальченко И.В. Наркотические средства природного происхождения и методы их определения // *Ж. аналит. химии*. 2016. Т. 71. № 1. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S004445021601014X>

Temerdashev A.Z., Grigoryev A.M., Rybalchenko I.V. Narcotic drugs of natural origin and methods for their determination // *J. Anal. Chem.* 2016. V. 71. № 1. P. 3–22. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S004445021601014X>

11. Темердашев А.З., Григорьев А.М., Рыбальченко. И.В. Эволюция новых наркотических средств и методы их определения // *Ж. аналит. химии*. 2014. Т. 69. № 9. С. 1–28. <https://doi.org/10.7868/S0044450214090114>

Temerdashev A.Z., Grigoryev A.M., Rybalchenko I.V. The evolution of new drugs and methods for their determination // *J. Anal. Chem.* 2014. V. 69. № 9. P. 1–28. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0044450214090114>

12. Flanagan R.J., Cuypers E., Maurer H.H., Whelpton R. *Fundamentals of analytical toxicology*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2020. 599 p.

13. Григорьев А.М., Реброва С.Г., Крупина Н.А. Скрининговые процедуры при анализе объектов биологического происхождения методом жидкостной хроматографии/масс-спектрометрии: возможные затруднения // *Наркология*. 2016. № 10. С. 88–100.

Grigoryev A.M., Rebrova S.G., Krupina N.A. Screening procedures in the analysis of objects of biological origin by liquid chromatography/mass

spectrometry: possible difficulties // *Narcology*. 2016. № 10. P. 88–100. (in Russian).

14. Hutter M., Kneisel S., Auwärter V., Neukamm M.A. Determination of 22 synthetic cannabinoids in human hair by liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *J. Chromatogr. B*. 2012. V. 903. P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2012.07.002>

15. Maurer H.H. Multi-analyte procedures for screening for and quantification of drugs in blood, plasma, or serum by liquid chromatography-single stage or tandem mass spectrometry (LC-MS or LC-MS/MS) relevant to clinical and forensic toxicology // *Clin. Biochem.* 2005. V. 38. № 4. P. 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2005.01.014>

16. Kempf J., Traber J., Auwärter V., Huppertz L.M. ‘Psychotropics caught in a trap’ – adopting a screening approach to specific needs // *Forensic Sci. Int.* 2014. V. 243. P. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.04.035>

17. Wissenbach D.K., Meyer M.R., Remane D. et al. Drugs of abuse screening in urine as part of a metabolite-based LC-MSn screening concept // *Anal. Bioanal. Chem.* 2011. V. 40. № 10. P. 3481–3489. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5032-1>

18. Broecker S., Herre S., Pragst F. General unknown screening in hair by liquid chromatography-hybrid quadrupole time-of-flight mass spectrometry (LC-QTOF-MS) // *Forensic Sci. Int.* 2012. V. 218. № 1-3. P. 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.10.004>

19. Li Z., Huang X., Wang X., Ren J., Xu B., Wang Y., Zou X., Wang L. Establishment and application of a screening method for 354 organic toxicants in blood and urine with high-performance liquid chromatography-high resolution orbitrap mass spectrometry // *Anal. Bioanal. Chem.* 2022. In press.

20. Recommended operating procedures for analysis in the verification of chemical disarmament / Ed. Vannien P. Helsinki: University of Helsinki, 2017. 809 p. <http://www.helsinki.fi/veri-fin/bluebook>

21. Badoud F., Grata E., Perrenoud L., Avois L. et al. Fast analysis of doping agents in urine by ultra-high-pressure liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry I. Screening analysis // *J. Chromatogr. A*. 2009. V. 1216. № 20. P. 4423–4433. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.03.033>

22. Maurer H.H. Systematic toxicological analysis of drugs and their metabolites by gas chromatography-mass spectrometry // *J. Chromatogr. B*. 1992. V. 580. № 1-2. P. 3–41. [https://doi.org/10.1016/0378-4347\(92\)80526-v](https://doi.org/10.1016/0378-4347(92)80526-v)

23. Maurer H.H. Systematic toxicological analysis procedures for acidic drugs and/or metabolites relevant to clinical and forensic toxicology and/or doping control // *J. Chromatogr. B*. 1999. V. 733. № 1-2. P. 3–25. [https://doi.org/10.1016/s0378-4347\(99\)00266-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4347(99)00266-2)

24. Grigoryev A., Kavanagh P., Dowling G., Rodin I. Tentative identification of etazene (etodesnitazene) metabolites in rat serum and urine by gas chromatography-mass spectrometry and accurate

- mass liquid chromatography-mass spectrometry // J. Anal. Toxicol. 2022. bkac001. <https://doi.org/10.1093/jat/bkac001>
25. Papaseit E., Moltó J., Muga R. et al. Clinical pharmacology of the synthetic cathinone mephedrone // Curr. Top. Behav. Neurosci. 2017. V. 32. P. 313–332. https://doi.org/10.1007/7854_2016_61
26. Заикина О.Л., Шилов В.В., Лодягин А.Н. и др. Установление структур свободных и глюкуронидированных метаболитов α -пирролидиновалерофенона в моче человека методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии при измерении точных масс // Ж. аналит. химии. 2019. Т. 74. № 5. С. 381–396. <https://doi.org/10.1134/S0044450219020130>
- Zaikina O.L., Shilov V.V., Lodyagin A.N. et al. Establishment of the structures of free and glucuronidated metabolites of α -pyrrolidinovalerophenone in human urine by liquid chromatography-mass spectrometry when measuring accurate masses // J. Anal. Chem. 2019. V. 74. № 5. P. 381–396. <https://doi.org/10.1134/S0044450219020130>
27. de la Torre R., Farré M., Roset P.N. et al. Human pharmacology of MDMA: pharmacokinetics, metabolism, and disposition // Ther. Drug Monit. 2004. V. 26. № 2. P. 137–144. (in Russian). <https://doi.org/10.1097/00007691-200404000-00009>
28. Olesti E., Farré M., Papaseit E. et al. Pharmacokinetics of mephedrone and its metabolites in human by LC-MS/MS // AAPS J. 2017. V. 19. № 6. P. 1766–1778. <https://doi.org/10.1208/s12248-017-0132-2>
29. Kavanagh P., Gofenberg M., Shevyrin V. et al. Tentative identification of the phase I and II metabolites of two synthetic cathinones, MDPHP and α -PBP, in human urine // Drug Test. Anal. 2020. V. 12. № 10. P. 1442–1451. <https://doi.org/10.1002/dta.2891>
30. Никитин Е.В., Григорьев А.М., Грибкова С.Е. и др. Хроматомасс-спектрометрические характеристики новых дизайнерских катинонов, а также их метаболитов, полученных с помощью *in vivo* и *in vitro* методов // Масс-спектрометрия. 2020. Т. 17. № 2. С. 112–121. <https://doi.org/10.25703/MS.2020.17.24>
- Nikitin E.V., Grigoryev A.M., Gribkova S.E. et al. Chromatography-mass spectrometric characteristics of new designer cathinones, as well as their metabolites obtained using *in vivo* and *in vitro* methods // Mass spectrometry. 2020. V. 17. № 2. P. 112–121. (in Russian). <https://doi.org/10.25703/MS.2020.17.24>
31. The cannabinoid receptors / Ed. Reggio P.H. New York: Humana Press, 2009. 396 p.
32. Makriyannis A., Deng H. Cannabimimetic Indole Derivatives. US Patent No. 208/0090871, 2008.
33. Гончаров Е.В., Кондрасенко А.А., Петерсон И.В. и др. Идентификация и аналитические профили синтетического каннабиноида 3,3-диметил-2-(2-(1-(4-фторбензил)-1H-индол-3-ил)ацетамидо)бутанамида (ADB-FUBIATA, FUB-ACADB) // Бутилеровские сообщения. 2021. Т. 68. № 10. С. 133–140. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/21-68-10-133>
- Goncharov E.V., Kondrasenko A.A., Peterson I.V. et al. Identification and analytical profiles of the synthetic cannabinoid 3,3-dimethyl-2-(2-(1-(4-fluorobenzyl)-1H-indol-3-yl)acetamido)butanamide (ADB-FUBIATA, FUB-ACADB) // Butlerov Readings. 2021. V. 68. № 10. P. 133–140. (in Russian). <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/21-68-10-133>
34. Liu C.-M., Hua Z.-D., Jia W., Li T. Identification of AD-18, 5F-MDA-19, and pentyl MDA-19 in seized materials after the class-wide ban of synthetic cannabinoids in China // Drug Test. Anal. 2022. V. 14. № 2. P. 307–316. <https://doi.org/10.1002/dta.3185>
35. Kavanagh P., Pechnikov A., Nikolaev I. et al. Detection of ADB-BUTINACA metabolites in human urine, blood, kidney and liver // J. Anal. Toxicol. 2022. V. 46. № 6. P. 641–650. <https://doi.org/10.1093/jat/bkab088>
36. Meyer M.R., Maurer H.H. Absorption, distribution, metabolism and excretion pharmacogenomics of drugs of abuse // Pharmacogenomics. 2011. V. 12. № 2. P. 215–233. <https://doi.org/10.2217/pgs.10.171>
37. Higashikawa Y., Suzuki S. Studies on 1-(2-phenethyl)-4-(N-propionylanilino)piperidine (fentanyl) and its related compounds. VI. Structure-analgesic activity relationship for fentanyl, methyl-substituted fentanyls and other analogues // Forensic Toxicol. 2008. V. 26. № 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11419-007-0039-1>
38. Заикина О.Л., Шилов В.В., Лодягин А.Н., Григорьев А.М. Особенности обнаружения производных фентанила в моче методами газовой и жидкостной хроматомасс-спектрометрии // Токсикологический вестник. 2016. № 3. С. 41–46. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-3-41-46>
- Zaikina O.L., Shilov V.V., Lodyagin A.N. et al. Features of the detection of fentanyl derivatives in urine by gas and liquid chromatography-mass spectrometry // Toxicological Bulletin. 2016. № 3. P. 41–46. (in Russian). <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-3-41-46>
39. Родин И.А., Грибкова С.Е., Григорьев А.М. и др. Обнаружение метаболитов нового психоактивного вещества фуранилфентанила в моче и сыворотке крови лабораторных крыс методом жидкостной хроматомасс-спектрометрии // Масс-спектрометрия. 2017. Т. 14. № 4. С. 242–251.
- Rodin I.A., Gribkova S.E., Grigoryev A.M. et al. Detection of metabolites of the new psychoactive substance furanylfentanyl in the urine and blood serum of laboratory rats by liquid chromatography-mass spectrometry // Mass spectrometry. 2017. V. 14. № 4. P. 242–251. (in Russian).
40. Krotulski A.J., Papsun D.M., Kacinko S.L., Logan B.K. Isotonitazene quantitation and metabolite discovery in authentic forensic casework // J. Anal. Toxicol. 2020. V. 44. № 6. P. 521–530. <https://doi.org/10.1093/jat/bkaa016>
41. Braden M.R., Parrish J.C., Naylor J.C., Nichols D.E. Molecular interaction of serotonin 5-HT_{2A} receptor residues Phe339(6.51) and Phe340(6.52) with superpotent N-benzyl phenethylamine agonists // Mol.

Pharmacol. 2006. V. 70. № 6. P. 1956–1964. <https://doi.org/10.1124/mol.106.028720>

42. Hansen M., Phonekeo K., Paine J.S. et al. Synthesis and structure-activity relationships of N-benzyl phenethylamines as 5-HT_{2A/2C} agonists // ACS Chem. Neurosci. 2014. V. 5. № 3. P. 243–249. <https://doi.org/10.1021/cn400216u>

43. Заикина О.Л., Шилов В.В., Лодягин А.Н. и др. Практические аспекты диагностики приема соединений группы NBOMe. Краткий обзор фармакологии, токсических свойств и психоактивных эффектов // Наркология. 2018. № 9. С. 78–89. <https://doi.org/10.25557/1682-8313.2018.09.78-89>

Zaikina O.L., Shilov V.V., Lodyagin A.N. et al. Practical aspects of diagnosing the intake of compounds of the NBOMe group. Brief review of pharmacology, toxic properties and psychoactive effects // Narcology. 2018. № 9, P. 78–89. (in Russian). [https://doi.org/10.25557/1682-](https://doi.org/10.25557/1682-8313.2018.09.78-89)

8313.2018.09.78-89

44. Заикина О.Л., Шилов В.В., Лодягин А.Н. и др. Практические аспекты диагностики приема соединений группы NBOMe. Обнаружение NBOMe и их метаболитов методами газовой и жидкостной хромато-масс-спектрометрии в биологических объектах // Наркология. 2018. № 10. С. 86–96. <https://doi.org/10.25557/1682-8313.2018.10.85-96>

Zaikina O.L., Shilov V.V., Lodyagin A.N. et al. Practical aspects of diagnosing the intake of compounds of the NBOMe group. Detection of NBOMe and their metabolites by gas and liquid chromatography-mass spectrometry in biological objects // Narcology. 2018. № 10. P. 86–96. (in Russian). <https://doi.org/10.25557/1682-8313.2018.10.85-96>

45. Ellison D.H. Handbook of chemical and biological warfare agents. Second ed. Boca Raton, London: CRC Press, 2008.

Об авторах

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации, 111004, Российская Федерация, г. Москва, Проезд Энтузиастов, д. 19.

Фатеенков Дмитрий Николаевич. Начальник отдела. Кандидат военных наук, доцент, профессор АВН. Григорьев Андрей Михайлович. Старший научный сотрудник. Доктор химических наук.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_1@mil.ru

Контактное лицо: Григорьев Андрей Михайлович; 27nc_1@mil.ru

Modern Psychoactive Substances and Their Detection in Biomedical Samples

A.M. Grigoryev, V.N. Fateenkov

Federal State Budgetary Establishment «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Entuziastov passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation

Received September 25, 2021. Accepted December 23, 2022

Scientific and technological advancement of the mid- and late twentieth century led to the creation of a large number of new psychoactive substances (NPS), diverse in composition and spectrum of action. The primary stages of fight the spread of NPS are awareness of their characteristics, as well as the possibility of detecting both the substances themselves and biomarkers of their use (metabolites) in human biological objects. The *purpose of the work* is to review psychoactive compounds and methods of their detection performed for diagnostic purposes. The paper presents brief characteristics of the most common NPS, as well as features of their metabolism in the human. It is shown that the analysis of biological specimens collected from susceptible drug users is difficult due to the low content of analytes, the matrix influences, metabolism and the formation of various artifacts. The general scheme of screening of biological objects assumes the presence of two stages – a preliminary express analysis performed using immunochemical test systems, and a confirmatory analysis performed by gas and liquid chromatography-mass spectrometry. The article discusses the possibilities and limitations of targeted and non-targeted screening. The subject of special consideration was the problems of using chromatography-mass spectrometry methods of NPS analysis in Russian – issues of accessibility of standard substances, search libraries, etc. The article also presents brief characteristics of individual families of NPS, such as stimulants, synthetic cannabinoids, synthetic opioids and hallucinogens. In

addition, the article shows that in a number of foreign armies, in particular, in the Armed forces of Ukraine (AFU), drugs and psychostimulants are used to create «fearless soldiers». Thus, methadone, amphetamine and other psychoactive substances, as well as a psychotomimetic – a structural and pharmacological similarity of the prohibited BZ – were found in objects delivered from the positions of the AFU for analysis.

Keywords: amphetamine; biological object; gas chromatography-mass spectrometry; hallucinogen; liquid chromatography-mass spectrometry; immunochemical assay; metabolism; methadone; narcotic drugs; psychoactive substances; Russia; synthetic cannabinoids; synthetic opioids; screening; stimulators; Ukraine; express analysis; BZ.

For citation: Grigoryev A.M., Fateenkov V.N. Modern Psychoactive Substances and Their Detection in Biomedical Samples // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6. No 4. P. 320–341. EDN: EUKKMS. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-320-341>

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. Federal State Budgetary Establishment «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

References

See P. 337–340.

Authors

Federal State Budgetary Establishment «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Dmitry Nikolaevich Fateenkov. Head of Department. PhD in Military Sciences, Associate Professor, Professor at the AMS.

Andrej Mihajlovich Grigoryev. Research associate. Grand PhD in Chemistry.

Contact information for all authors: 27nc_1@mil.ru

Contact person: Andrej Mihajlovich Grigoryev; 27nc_1@mil.ru

Новые ферментные мишени для фосфорорганических соединений

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022
УДК 615.355; 623.459; 577.152.411
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-342-354>
<https://elibrary.ru/dmkjoe>



Е.Н. Ефременко, А.Г. Асланлы, И.В. Лягин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

Поступила 12 июля 2022 г. Принята к публикации 27 сентября 2022 г.

Декарбоксилаза ароматических аминокислот (ДАА), гистидиндекарбоксилаза (ГД) и глутаматдекарбоксилазы (ГлД) с разной молекулярной массой катализируют наиболее важные реакции биосинтеза нейротрансмиттеров и нейромодуляторов. Пиридоксальфосфат, который служит для этих ферментов кофактором, является фосфорорганическим соединением (ФОС), имеющим структуру, сходную с такими высокотоксичными отравляющими веществами (ОВ), как зарин, зоман, Vx, вещество типа Vx, табун и так называемыми «Новичками» (A230, A232, A234), а также с пестицидами, широко применяемыми в сельском хозяйстве (хлорпирифосом, малатионом, глифосатом, мипафоксом, диазиноном, параоксоном), исходя из их ингибирующего воздействия на холинэстеразы (ХЭ). Цель работы – с помощью методов компьютерного моделирования оценить возможность связывания различных ФОС с каталитическими центрами указанных ферментов вместо кофактора, а также аналогичные взаимодействия декарбоксилаз (ДК) с ФОС, когда активные центры ДК уже содержат встроенный кофактор. Молекулярный докинг показал, что целый ряд из указанных ФОС может конкурировать с кофактором за связывание с активными центрами ДК, причем все исследованные ФОС (пестициды и ОВ) создают препятствия для встраивания кофактора в активный центр ДАА и ГД. Подобные взаимодействия будут приводить к снижению уровня образования продуктов соответствующих каталитических реакций (дофамина, серотонина, фенилэтиламина, серотонина, γ -аминомасляной кислоты) и проявлению ими своих физиологических функций. Установлено, что при наличии кофактора в активном центре исследованных ДК, взаимодействие ряда ФОС с поверхностью этих ферментов возле активного центра усиливается и превышает силу взаимодействия этих же ферментов с их типичными субстратами. При этом максимальное взаимодействие, которое может приводить к существенной инактивации всех исследованных ДК, было выявлено для пестицидов, тогда как для ОВ эффект от их присутствия был ниже. Один из высоких уровней возможного влияния на активность ДК был выявлен для хлорпирифоса и диазинона. Суммарно, для ДК более опасными веществами с высокой потенциальной нейротоксичностью оказались вовсе не ОВ, включая «Новички», а именно пестициды, которые по их известному воздействию на ХЭ, считаются малотоксичными ФОС. Проведенные новые теоретические исследования свидетельствуют о том, что, во-первых, требуются прямые экспериментальные исследования, которые подтвердят произведенные биоинформационные расчеты; во-вторых, необходим пересмотр давно существующих подходов к оценке нейротоксичности различных ФОС, основанных преимущественно на использовании ХЭ для этих целей; в-третьих, возможно следует сформулировать задачи по разработке и применению новых систем определения потенциально нейротоксичных веществ, действие которых будет основано на применении разных ДК; в четвертых, изучить возможность применения ДК в качестве основы для разработки новых каталитических ферментных детоксификаторов (антидотов) и регенераторов ЦНС.

Ключевые слова: фосфорорганические соединения; отравляющие вещества; пестициды; ингибиторы; декарбоксилазы; компьютерное моделирование; пиридоксальфосфат; нейродегенеративные заболевания; химическая безопасность.

Библиографическое описание: Ефременко Е.Н., Асланлы А.Г., Лягин И.В. Новые ферментные мишени для фосфорорганических соединений // Вестник РХБ защиты. 2022. Т. 6. № 4. С. 342–354. EDN: DMKJOE. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-342-354>

Необходимость обеспечения химической безопасности населения требует особое внимание к вопросам, связанным с контролем присутствия синтетических токсичных фосфорорганических соединений (ФОС) в различных объектах окружающей среды, продуктах питания, источниках воды. При этом в качестве веществ, которые в современном мире могут формировать угрозу химической безопасности, упоминаются не только отравляющие вещества (ОВ), но и традиционно применяемые в сельском хозяйстве фосфорорганические пестициды (ФОП) [1, 2], производство и применение которых в качестве средств защиты растений и животных в мире не снижается. Проблема ФОП состоит в том, что по своей химической структуре они подобны ОВ (таблица 1), хотя, согласно используемым системам детекции, основанным на определении ингибирующего воздействия на холинэстеразы [3], ФОП обладают существенно сниженной или малой токсичностью, что и позволяет их широко применять на практике. Однако для многих ФОС (как ОВ, так и ФОП) показано их проникновение через гематоэнце-

фалический барьер (ГЭБ), негативное влияние на функционирование центральной нервной системы [2, 4, 5]. Это проявляется в том, что Всемирная организация здравоохранения официально признает ежегодную регистрацию порядка 3 млн доказанных случаев отравления пестицидами, из которых 250 тыс. заканчиваются летальным исходом [1]. В качестве мишеней для определения токсичности ФОС чаще всего используется ацетилхолинэстераза (АХЭ), однако известны попытки адаптации для тех же целей других ферментов: различных эстераз, фосфолипаз, пептидаз и ферментов общего метаболизма [1, 6–9].

В связи с множественными сообщениями в последнее время в научной литературе о том, что именно активное применение ФОП в ЕС и США приводит к развитию нейродегенеративных заболеваний у взрослых и аутизма у детей [9, 10] наше внимание привлекли к себе декарбоксилазы (ДК).

Эти ферменты из класса лигаз осуществляют декарбоксилирование аминокислот, альфа- и бета-кетокислот [11] (рисунок 1).

Таблица 1 – Химические структуры кофактора декарбоксилаз (пиридоксальфосфата) и молекул ФОС (отравляющих веществ и сельскохозяйственных пестицидов)

| Вещество | Структура | Вещество | Структура |
|---|-----------|------------------------------|-----------|
| Пиридоксальфосфат – кофермент декарбоксилаз | | | |
| A-230 | | Глифосат | |
| A-232 | | Хлорпирифос | |
| A-234 | | Хлорпирифос-оксон | |
| Зарин | | Зоман | |
| Табун | | Мипафокс | |
| Вещество VX | | Диизопропилфтор-фосфат (ДФФ) | |
| Вещество типа VX | | Параоксон | |
| Диазинон | | Малатион | |

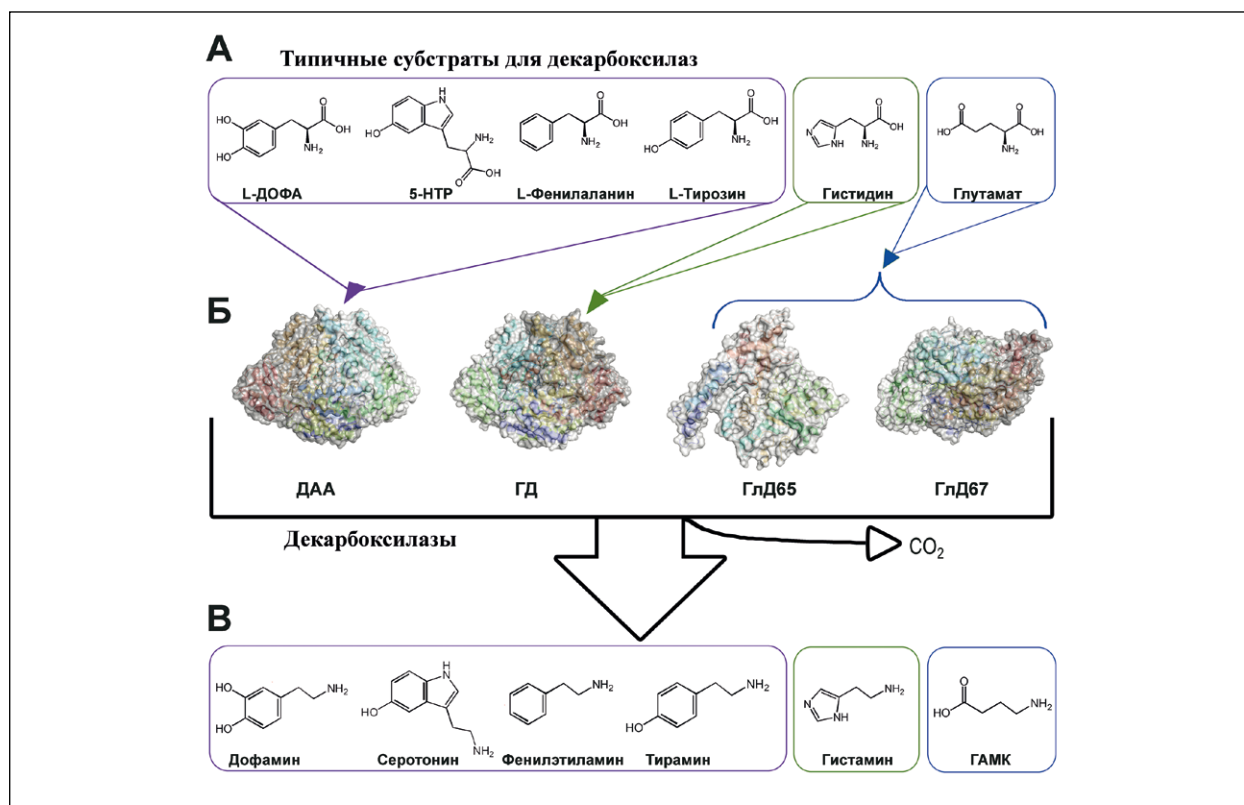


Рисунок 1 – Типичные субстраты (А) и ферменты (Б) в реакциях декарбоксилирования основных аминокислот под действием декарбоксилазы ароматических аминокислот (ДАА), гистидина под действием гистидиндекарбоксилазы (ГД) и глутамата под действием двух изоформ глутаматдекарбоксилазы с молекулярными массами 65 кДа (ГлД65) и 67 кДа (ГлД67), приводящих к биосинтезу важнейших нейротрансмиттеров и нейромодуляторов (В), где L-ДОФА – L-3, 4-гидроксифенилаланин, 5-НТР – 5-гидрокситриптофан, ГАМК – γ -аминомасляная кислота [11]

Продуктами каталитических реакций трех наиболее важных ДК, а именно, декарбоксилазы ароматических аминокислот (ДАА), гистидиндекарбоксилазы (ГД) и глутаматдекарбоксилазы (ГлД), являются нейротрансмиттеры, играющие важнейшую роль в функционировании центральной нервной системы (ЦНС). Сбои в функционировании именно этих ферментов приводят к дефициту или избытку соответствующих нейромедиаторов, что приводит к развитию серьезных нейродегенеративных патологий [12, 13]. Пиридоксальфосфат (ПФ) является коферментом для всех этих ДК (таблица 1) и имеет структурную аналогию с антропогенными ФОС. В этой связи возникает теоретическая вероятность ингибирования ДК путем замены этого кофермента в молекулах указанных ферментов на молекулы ФОС, особенно если учесть, что связывание ПФ в активном центре ДК может быть, условно говоря, «рыхлым» [11, 14–16].

Предсказательная способность современных методов биоинформатики очень высока, и она, как показывают различные исследования, позволяет достаточно релевантно

моделировать взаимодействие ферментов-мишеней не только с низкомолекулярными, но и с высокомолекулярными соединениями [17–19]. В свою очередь, эти методы существенно облегчают и способствуют прогрессу в области молекулярной токсикологии, поскольку часто физически невозможно выделить и исследовать *in vitro* все потенциальные биохимические мишени.

Именно современный уровень развития химии и биоинформатики позволяет использовать методы компьютерного моделирования для проведения теоретических экспериментов с различными ферментами. В данном случае речь идет о ДК, которые катализируют наиболее важные реакции биосинтеза нейротрансмиттеров и нейромодуляторов (рисунок 1), чтобы выявить их вероятностное взаимодействие с молекулами различных ФОС (таблица 1), среди которых могут быть как пестициды, так и фосфорорганические ОВ, включая ОВ, называемые на Западе «Новичками» [19–22]. Результатом таких взаимодействий может быть ингибирование ферментов, вероятность и степень которого можно научно обоснованно предсказать.

Цель работы – с помощью методов компьютерного моделирования оценить возможность связывания различных ФОС с каталитическими центрами указанных ферментов вместо кофактора, а также аналогичные взаимодействия ДК с ФОС, когда активные центры ДК уже содержат встроенный кофактор.

Материалы и методы

Структуры ФОС и других соединений были созданы с использованием программного обеспечения ChemBioDraw (версия 12.0, CambridgeSoft, Кембриджшир, Великобритания). После этого была применена минимизация энергии с использованием ChemBio3D с силовым полем MM2. Структуры в формате банка данных белка (.PDB) были преобразованы в формат PDBQT (формат PDB с частичными зарядами и типами атомов) с использованием AutoDockTools (как часть MGLTools версии 1.5.6, доступного <http://mgltools.scripps.edu/>) с атомными зарядами, рассчитанными с помощью Метода Гастейгера-Марсили. Кристаллографические структуры ДК были получены из Банка данных белков¹.

Чтобы рассчитать распределение поверхностного заряда ферментов при физиологическом значении pH, адаптивный решатель Пуассона-Больцмана (APBS) и серверы PDB2PQR (версии 1.4.2.1 и 2.1.1 соответственно², с использованием настроек по умолчанию). После этого структуры в формате PQR были преобразованы в формат PDBQT с помощью AutoDockTools.

Комплексы «молекула фермент/молекула ФОС» рассчитывали с использованием AutoDock Vina (версия 1.1.2³) [23]. Вычисления выполнялись с использованием параметров программы по умолчанию. Структура молекулы фермента была предложена как «жесткий», а «лиганд» (т.е. молекула ФОС) – как полностью гибкий элемент. Были отобраны 12 лучших моделей с минимальной затратой энергии. Расстояния между атомами каталитических групп в активном центре ферментов и ближайшими атомами лигандов, а также занимаемые площади измеряли и визуализировали с помощью системы молекулярной графики

RyMOL (версия 1.7.6, schrodinger's, LLC, Нью-Йорк, Нью-Йорк, США).

Статистический анализ проводился с использованием SigmaPlot (версия 12.5, Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США), и данные представлены в виде средних \pm стандартное отклонение (\pm SD), если не указано иное. Односторонний дисперсионный анализ (ANOVA) был реализован для обработки выборочных групп значений аффинности ($N = 12$) с множественными сравнениями по методу Холма-Сидака. Прямоугольную диаграмму средних квадратичных колебаний остатков AADC ($N = 931$) и GAD65 ($N = 485$) визуализировали с помощью OriginPro (версия 9.4, OriginLab Corp., Нортгемптон, Массачусетс, США).

Структуры молекул «Новичков», использованные для проведения молекулярного моделирования, представлены в таблице 1 (A-230, A-232, A-234) в соответствии с Перечнями химических веществ Конвенции о химическом оружии с номерами CAS⁴ 2387496-12-8, 2387496-04-8, 2387496-040 [CWC-2020] как ОБ нервно-паралитического действия, как указано ранее [20]. Следует отметить, что среди них только A-232 имеет известный номер CAS 2387496-04-8.

Результаты и обсуждение

Локализация молекул ФОС на поверхности молекул декарбоксилаз

Был проведен молекулярный докинг всех ФОС, выбранных для компьютерного моделирования (таблица 1), к поверхности четырех ДК (рисунок 1) в присутствии и в отсутствие кофактора в активном центре ферментов. На примере молекулы глифосата, который является широко применяемым сегодня во всем мире, особенно в странах ЕС, гербицидом, на рисунке 2 показано, как именно это было сделано.

Для сравнительного анализа аналогичные модели были получены для тех же ферментов с кофактором, а также с соответствующими им субстратами.

Особое внимание было уделено предпочтительной локализации молекул ФОС на поверхности ДК, в частности, в области активного центра, определяющего успешность катализа.

¹ URL: <https://www.rcsb.org> (дата обращения: 10.06.2022).

² URL: <http://www.poissonboltzmann.org/> (дата обращения: 10.06.2022).

³ URL: <http://vina.scripps.edu/> (дата обращения: 10.06.2022).

⁴ Уникальный идентификатор CAS присваивается Химической реферативной службой (Chemical Abstracts Service, CAS) – подразделением Американского химического общества (American Chemical Society; <https://www.cas.org/>), которое издает с 1907 г. реферативный журнал «Chemical Abstracts». Это уникальный численный идентификатор химических соединений, полимеров, биологических последовательностей нуклеотидов или аминокислот, смесей и сплавов, внесенных в реестр CAS. Используется для однозначной идентификации химического соединения. Кроме индекса, каждое вещество также получает уникальное название, как правило, сконструированное по жестким правилам номенклатуры Химической реферативной службы.

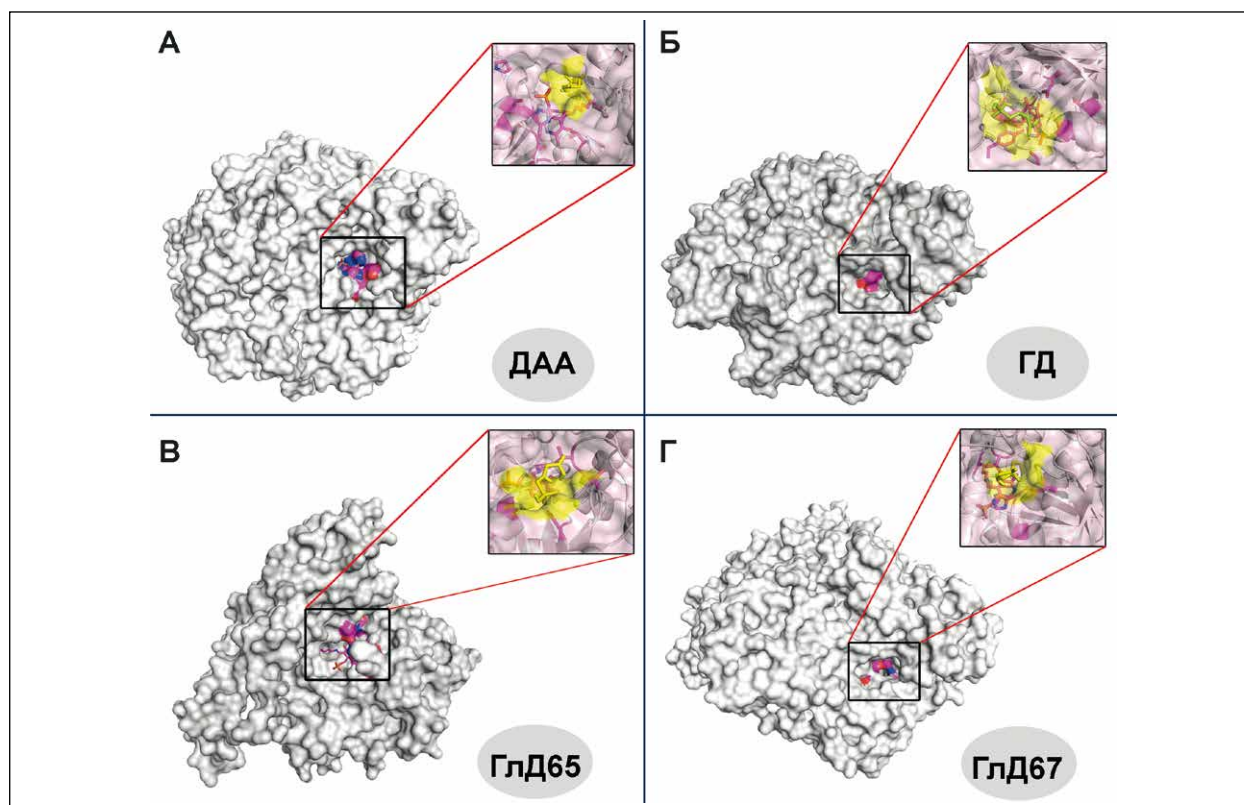


Рисунок 2 – Локализация молекулы глифосата в активном центре (А) декарбоксилазы ароматических аминокислот (ДАА), Б – гистидиндекарбоксилазы (ГД), В – глутаматдекарбоксилазы-65 (ГлД65) и Г – глутаматдекарбоксилазы-67 (ГлД67) в присутствии кофермента (пиридоксальфосфата). Аминокислотные остатки в активных центрах ферментов и молекулы кофактора окрашены в малиновый цвет. Молекула глифосата и область, занимаемая ею на поверхности ферментов, показаны желтым цветом, а место локализации активного центра каждого фермента, где происходят взаимодействия, выделены квадратом (данные авторов)

Полученные данные были обработаны и представлены в таблице 2. Для всех ДК большое количество молекул ФОС оказалось локализовано рядом с активным центром фермента независимо от того был встроен кофактор в активный центр ДК или нет. При этом молекулы ФОС перекрывали собой входы в каталитические центры ферментов для их типичных субстратов.

На практике это обязательно будет проявляться в снижении скоростей реакций, катализируемых ДК, и, как следствие, в снижении уровня накопления продуктов реакций, катализируемых ДК, и локальных увеличениях концентраций субстратов. Оба эти последствия (избыток субстратов ДК и недостаток их продуктов) являются негативными для здоровья человека.

Самая высокая вероятность ингибирования ферментов молекулами ФОС была обнаружена для ферментов ДАА и ГлД67, для которых было отмечено блокирование их активных центров при докинге абсолютно всеми молекулами ФОС, не зависимо от того, были ли это ОВ или ФОП. При этом для остальных ДК

было показано, что отсутствие ПФ в активном центре приводит к тому, что ФОС тоже не приближается к нему, и наоборот – заполнение активного центра фермента кофактором способствует тому, что ФОС также локализуется возле активного центра. Наиболее ярко это было продемонстрировано на примере фермента ГлД65.

Интересно, что зоман, вещество Vx, а также глифосат и малатион не зависимо от типа ДК и состояния фермента (встроен или нет в него кофактор) однозначно перекрывали каталитические центры всех ДК, представляя максимальную угрозу, с точки зрения ингибирующего воздействия, для них (таблица 2).

Помимо локализации молекул ФОС и перекрытия ими активных центров ДК была проведена еще и оценка площадей, которые ФОС занимают в этих областях фермента. Оказалось, что среди всех ДК максимальная площадь, занимаемая ФОС вблизи активного центра, наблюдается для ГлД65 (почти в 2 раза выше, чем для других ферментов). Значительное увеличение площади, занимаемой ФОС вблизи ак

Таблица 2 – Перекрытие входов в каталитические центры декарбоксилаз молекулами ФОС в полученных компьютерных моделях отмечены красным цветом (зеленым цветом отмечены «доступные» для взаимодействия активные центры ферментов)*

| Фермент | ФОС | A-230 | A-232 | A-234 | Зарин | Зоман | Табун | Вещество VX | Вещество типа VX | Глифосат | Хлорпирифос-оксон | Хлорпирифос | Диазинон | Мипафокс | Малатион | Параоксон | ДФФ | |
|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|------------------|----------|-------------------|-------------|----------|----------|----------|-----------|-----|-----|
| | | ДАА | *А | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| ГД | Б | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| | А | Red | Green | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Green | Green | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| ГлД65 | А | Red | Red | Red | Red | Green | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| | Б | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Green | Red | Red | Red | Red | Red |
| ГлД67 | А | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |
| | Б | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red | Red |

Примечание:
 *А и Б - декарбоксилазы без кофактора и с кофактором в активном центре соответственно.
 **Активные центры ферментов считались перекрытыми в присутствии ФОС, если молекулы ФОС затрудняли вход субстратов в активные центры декарбоксилаз (данные авторов)

тивных центров ГлД65, было отмечено для ОВ после перехода фермента из неактивной в активную форму (т.е. после встраивания кофермента в его центр). И напротив, величина этого обсуждаемого параметра не сильно менялись во время такого же перехода для ГлД67.

Сравнение отношений площадей, занятых различными ФОС вблизи активных центров ДК, с общими площадями, занимаемыми ОВ и ФОП на поверхности ферментов, показало, что молекула фермента ДАА характеризуется максимально заполненной поверхностью любыми молекулами ФОС. Получается, что молекулы ФОС не только физически препятствуют катализу с участием этого фермента, но и, очевидно могут влиять на активность этого фермента, изменяя его активную конфигурацию за счет своего массового присутствия на молекуле ДАА в местах, отличных от активного центра. Интересно, что присутствие ПФ в активном центре ферментов не только не защищало ДК от присутствия молекул ФОС на поверхности ферментов, что прогнозировало их ингибирование, но и наоборот, приводило к ухудшению ситуации и увеличению числа молекул ФОС, связывающихся с поверхностью ДК.

Оценка энергии связывания молекул ФОС с молекулами декарбоксилаз

Необходимо отметить, что не каждое происходящее взаимодействие ФОС с молекулой фермента может привести к неизбежному ин-

гибированию ферментативной активности. Наиболее важными показателями, которые следует учитывать при предсказании негативного воздействия отдельных соединений на фермент, являются:

- локализация связывания (очевидно, что попадание молекулы ФОС непосредственно в активный центр приведет к конкуренции с субстратом за него),
- энергия/сила связывания (аффинность, т.е. термодинамический эффект),
- скорость (не)связывания (т.е. кинетический эффект).

Молекулярный докинг, как правило, дает возможность получить данные по первым двум показателям, а вот значение третьего показателя может быть найдено с помощью метода молекулярной динамики, используемого для моделирования взаимодействий сближения и взаимодействия веществ. Вместе с тем, понимание места локализации контакта ФОС и фермента (активный центр) и силы связывания часто предопределяет отсутствие необходимости применения указанного метода, который только уточняет, но не изменяет общего понимания результатов.

В этой связи далее был оценен термодинамический эффект от взаимодействия молекул ФОС с молекулами ДК и рассчитаны величины аффинности (энергии связывания) (рисунок 3) для всех исследуемых вариантов.

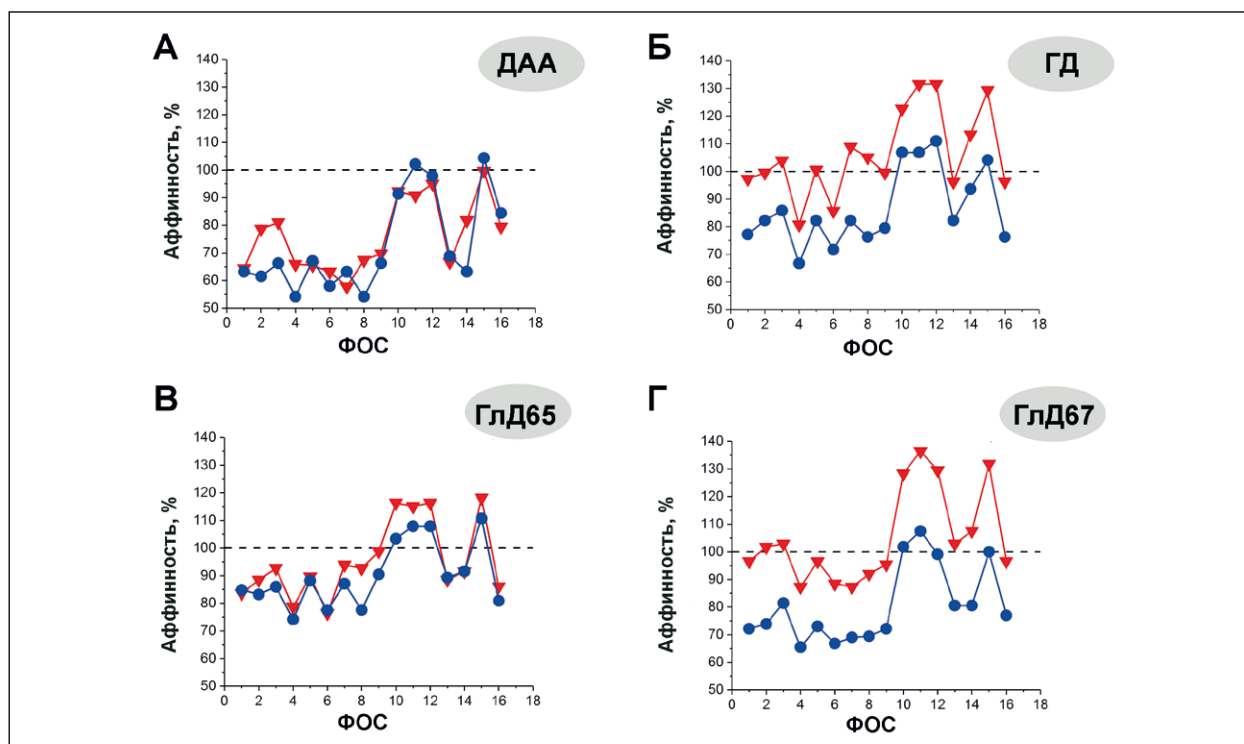


Рисунок 3 – Аффинность (энергия связывания) молекул ФОС (1 – А-230, 2 – А-232, 3 – А-234, 4 – зарин, 5 – зоман, 6 – табун, 7 – вещество VX (США), 8 – вещество VX (РФ), 9 – глифосат, 10 – хлорпирифос, 11 – хлорпирифос-оксон, 12 – диазинон, 13 – мипафокс, 14 – малатион, 15 – параоксон, 16 – ДФФ) (\blacktriangledown) кофермента (пиридоксальфосфата) в их активных центрах. Значения энергии связывания приведены в процентном отношении от 100 %, где за 100 % (отмечен пунктирной линией) в отсутствие кофермента – принята величина энергии связывания ферментов с кофактором, а в присутствии кофермента – величина энергии связывания ферментов с их типичными субстратами (L-ДОФА, гистидин и глутамат для ДАА, ГД и обеих изоформ ГлД соответственно) (данные авторов)

Следует отметить, что величины энергии связывания ФОС с молекулами ДК были приведены на рисунке 3 в процентном выражении от 100 %, при этом за 100 % принималась:

- величина энергии связывания каждого фермента с кофактором, если он исходно отсутствовал в активном центре ДК,

- величина энергии связывания ДК с их типичными субстратами (L-ДОФА, гистидин и глутамат для ДАА, ГД и обеих изоформ ГлД соответственно, рисунок 1).

Точки, лежащие на рисунке 3 выше уровня 100%, который отмечен пунктирной линией, соответствуют тем взаимодействиям ДК с молекулами ФОС, которые будут преобладать над типичными взаимодействиями этих ферментов либо с их кофактором, либо, соответственно, с их типичными субстратами.

Анализ полученных результатов оказался крайне интересным. Так, для всех ферментов все величины энергии взаимодействия с ОВ, за исключением только веществ А-232, А-234 и зомана, лежали существенно ниже тех уровней, которые характерны для энергии взаимодей-

ствия этих же ферментов с их кофакторами и специфичными субстратами. Вещества А-232, А-234 и зоман в случае ферментов ГД и ГлД67 практически имеют тот же уровень взаимодействия с активными центрами ДК, что и их кофакторы или субстраты. Это значит, что конкуренция между ними и ингибирующий эффект указанных веществ на отмеченные ферменты неизбежны. Присутствие кофактора только будет усугублять возникающее ингибирование.

И совсем иная ситуация наблюдалась с пестицидами, среди которых хлорпирифос, его оксон, а также диазинон и параоксон являются главными претендентами на мощное негативное воздействие на ЦНС в виде ингибирования сразу нескольких важнейших ДК. Так, взаимодействие молекул этих пестицидов превышают на 20 % все вышеуказанные «стандартные» взаимодействия для ГлД65, а в случае ГД и ГлД67 – на 35–40 %, причем наличие ПФ в активном центре ферментов лишь ухудшает ситуацию по возможному сильному и скорее всего (из-за величины энергии взаимодействия) необратимому ингибированию ферментов.

При этом получается, что эти пестициды оказываются существенно более опасными для ряда ДК и проявляемых этими ферментами функций, чем даже пресловутые токсичные «Новички». И если про параоксон известно, что этот пестицид является высоко токсичным, исходя из его ингибирующего воздействия на АХЭ, и потому он запрещен к применению в сельском хозяйстве, но используется сегодня как модельное ФОС для изучения отравлений животных ОВ и разработки антидотов [24, 25], то хлорпирифос и диазинон не только не ограничены сегодня в применении, но и широко ежедневно используются в сельском хозяйстве.

Полученные данные, хорошо согласуются с теми научными работами, которые сегодня появляются по хлорпирифосу [26], и в которых обсуждается крайне важный высокотоксичный аспект воздействия этого вещества на ЦНС, хотя описываются другие возможные механизмы воздействия, и про влияние хлорпирифоса на ДК в них пока речи не идет. В этом плане данная статья является, очевидно, одной из первых.

При анализе взаимодействий ФОС с молекулами ДК были определены аминокислотные остатки, которые являются ключевыми для каталитических реакций, и были идентифицированы потенциально критические взаимодействия. Оказалось, что все молекулы ФОС могут взаимодействовать с определенными аминокислотными остатками активного центра ДАА. Самая высокая частота взаимодействий ФОС во всех ДК наблюдалась с остатками гистидина и треонина, т.е. донорами водорода для образования водородных связей [23]. И в этой части исследований оказалось, что именно глифосат имеет наибольшее количество водородных связей, особенно с ферментом ГлД65, в активном центре которого присутствовал кофактор.

Здесь следует отметить, что, согласно полученным данным, ФОП представляют большую угрозу, чем ОВ, поскольку, в отличие от последних, они регулярно и интенсивно используются в сельском хозяйстве для обработки различных сельскохозяйственных культур, присутствуют в водных ресурсах, сырье и продукции сельского хозяйства, сохраняются в ней без разложения. ФОП обладают устойчивостью к разложению в условиях окружающей среды. Многие из этих ФОП, в частности, глифосат [27], считаются малотоксичными в соответствии с принятой градацией, основанной на их пониженном ингибирующем действии на АХЭ. Однако полученные в этой работе данные полностью согласуются с тем, что было установлено в ряде последних работ, а именно, что глифосат проникает в ГЭБ, и вследствие его

воздействия на астроциты наблюдается нарушение метаболизма глутамата [28]. Последнее как раз напрямую связано с проявлением ингибирования активности фермента ГлД65 (рисунк 1).

Следует отметить, что на основании полученных результатов пока невозможно сделать окончательный вывод о типе ингибирования ДК исследованными ФОС. Поскольку было обнаружено связывание ФОС не только в активном центре ДК, но и вне каталитического домена, что свидетельствует о том, что возможен не только конкурентный тип ингибирования. В целом, наиболее вероятен смешанный тип торможения ферментных реакций с различным сочетанием конкурентных и неконкурентоспособных типов ингибирования ДК. Однако фактически независимо от типа ингибирования ДК обнаруживаемым результатом таких взаимодействий ФОС с мишенями в виде ДК несомненно будет развитие нейродегенеративных процессов.

Возвращаясь к тому, что образование водородных связей вносит наибольший вклад в стабилизацию комплексов ФОС с ДК, следует подчеркнуть, что присутствие доступных аминокислотных остатков, которые могут выступать в качестве доноров (например, гистидина) или акцепторов протонов в полости активного центра, может быть дополнительным контрольным доказательством при исследовании других ферментов. С этой точки зрения ПФ как кофактор является акцептором/донором протонов как со стороны фосфатной группы, так и со стороны пиридиниевого азота. Тот факт, что определенные молекулы ФОС могут взаимодействовать с ДК более сильно, чем известные ингибиторы этих ферментов [23], указывает на то, что связывание ФОС является предпочтительным в конкуренции между ФОС и ингибиторами. Поскольку ингибиторы в этом случае не теряют своей эффективности и будут продолжать выполнять свою функцию в организме, существует высокая вероятность ингибирования большего количества ДК, чем это было изначально необходимо и предполагалось, например, для лечения нейродегенеративных заболеваний. В то же время очевидно, что молекулы ФОС могут конкурировать не только с ингибиторами ДК, применяемыми в терапевтических целях, но и с самим кофактором. Такая конкуренция может привести к ингибированию значительного числа молекул ДК, которые должны быть активированы кофактором для получения активных форм этих ферментов и участия в катализе, но они не смогут этого сделать. Конкуренция как с кофактором, так и с ингибиторами, вероятно, приведет к недостатку каталитически

активных форм ДК в организме, что выльется в функциональные нарушения в тех процессах и каталитических системах, которые связаны и/или регулируются теми нейротрансмиттерами, которые синтезируются этими ДК.

Поскольку считается, что многие неврологические и психические расстройства у людей вызваны дисбалансом концентраций нейромедиаторов, то на основании установленных данных можно предположить, что снижение каталитической активности рассмотренных ДК под действием ФОС может приводить к следующим последствиям:

- в результате частичной инактивации ДАА будет наблюдаться увеличение концентрации L-ДОФА (рисунок 1) из-за снижения скорости его превращения в дофамин, который, как известно, индуцирует развитие окислительного стресса в клетках ЦНС и приводит к проявлению симптомов, связанных с возбуждением нервной системы (агрессивность, раздражительность, переедание, приводящее к ожирению), а также проявлению состояний, связанных с шизофренией [30]. С другой стороны, известно, что снижение уровня дофамина в базальных ганглиях головного мозга приводит к проявлению симптомов болезни Паркинсона, депрессии, социальной изоляции (аутизм) и хронической усталости [31]. В то же время, как избыток субстрата (L-ДОФА), так и ограничение продукта реакции (дофамина) будут вызывать ухудшение памяти у людей;

- в результате снижения активности ферментов ГлД65 и ГлД67, которые участвуют в превращении глутамата в ГАМК (основной тормозящий нейромедиатор в ЦНС млекопитающих), в межклеточном пространстве нейроглии может образовываться избыток глутамата (возбуждающего нейромедиатора) и приводить к повреждению/гибели клеток ЦНС из-за его токсичности, а также проявляться в развитии аутизма [10] и болезни Альцгеймера;

- в результате частичной инактивации фермента ГД уровень образования гистамина будет снижен. В свою очередь, гистамин участвует в аутоиммунных реакциях (аллергия), секреции желудочной кислоты, контроле сна и приема пищи, накоплении костной массы, развитии шизофрении [32].

Таким образом, ФОС будут действовать не только на АХЭ, но и на ДК, которые важны для синтеза нейротрансмиттеров. Современные антитоды предназначены для защиты мускариновых рецепторов и АХЭ, но при этом никакие классические антитоды не подходят для защиты ДК в ЦНС. Проблема, связанная с возникновением такого ингибирования, заключается в том, что большинство антитодов, используемых сегодня для лечения отравлений

ФОС, не способны проникать через ГЭБ [29] и, следовательно, не могут защитить ферменты ЦНС от токсического воздействия ФОС.

Чтобы решить эту проблему, можно использовать современные ферментные антитоды, которые могут детоксицировать ФОС на уровне системы кровообращения, в том числе в результате продолжительной циркуляции в крови [19–21, 25] и катализа их гидролиза, приводящего к снижению тех концентраций ФОС, которые будут поступать в ЦНС. Потенциал таких антитодов высок и был продемонстрирован *in silico*, *in vitro* и *in vivo*. Вместе с тем полученные в данной работе результаты ориентированы на то, чтобы привлечь внимание к ДК, к их активности и инактивации ФОС как объектам и процессам, которые могут быть перспективными мишенями при разработке:

- принципиально новых, основанных не на ингибировании ХЭ, а на ингибировании других ферментов, методов определения ФОС с использованием биосенсоров,

- биочувствительных элементов–маркеров для выявления веществ и сред с нейротоксичностью и для оценки уровня их химической опасности,

- новых типов антитодов, защищающих ДК от ингибирующего воздействия ФОС, или средств, компенсирующих активность ДК,

- разработку процессов регенерации ДК или заместительной терапии по ДК, крайне важных для функционирования ЦНС.

При этом важно отметить, что в мире сегодня очень активно ведется скрининг источников получения ДК для их практического применения [33]. Установлено, что в качестве источников выделения этих ферментов могут использоваться клетки разных микроорганизмов, растений, животных, при этом в отдельных случаях подобные ферменты могут проявлять субстратную специфичность в своем каталитическом действии, аналогичную той, которую проявляют ДК человека. Интересно, что ДК молочнокислых бактерий [34], в том числе присутствующих в кишечнике человека, сегодня выходят на первый план обширных лабораторных исследований для биомедицинских применений, но, очевидно, что их использование можно рассматривать и с ориентиром на вышеуказанные цели (детекция, скрининг ФОС, антитодные средства). При этом сегодня в мире активно развиваются биотехнологические подходы, которые смогут обеспечить высокий уровень экспрессии рекомбинантных форм этих ДК в растворимой форме [35,36], гарантируя, таким образом, доступность ДК для научно-прикладных исследований и создания новых систем детекции и средств индивидуальной защиты.

Заключение

Таким образом, с помощью методов молекулярного моделирования была теоретически подтверждена возможность взаимодействия молекул различных ФОС с ДК. Существует необходимость использования анализа активностей более широкого спектра ферментов, значимых для человека, помимо рассмотрения степени ингибирования веществами АХЭ при изучении причин развития различных нейродегенеративных расстройств и для предотвращения токсического воздействия ФОС на организм человека.

Согласно результатам этой работы, ДК, после прямых лабораторных подтверждений их ингибирования молекулами ФОС, должны быть включены в список ферментов, которые применяются для анализа ФОС в дополнение к использованию АХЭ. Это важно, поскольку те ФОС, которые проявляют максимальную токсичность

по отношению к АХЭ, как оказалось проявляют себя иначе по отношению к ДК. В частности, те вещества, например, как глифосат, диазином, хлорпирифос, которые считаются безопасными в сравнении с ОБ из-за существенно более низких уровней ингибирования АХЭ, и широко используются на практике, они, вероятно, могут обладать свойствами, которые чрезвычайно опасны для здоровья человека. Результаты по ДК, полученные в этой работе, могут позволить рассматривать эти ферменты как новые мишени для воздействия ФОС, а их ингибирование - как причину потенциальной нейродегенерации. Это должно быть принято во внимание и глубоко исследовано специалистами по химической безопасности, если действительно есть интерес к развитию новых подходов к сбережению здоровья человека или восстановлению его у тех, кто подвергся острому или кумулятивному воздействию ФОС.

Вклад авторов/Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи. / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Финансирование. Работа подготовлена при выполнении Госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова №121041500039-8.

Список источников/References

1. Фосфорорганические нейротоксины / Под ред. Варфоломеева С.Д., Ефременко Е.Н. М.: РИОР, 2020. 380 с. <https://doi.org/10.29039/02026-5>

Organophosphorus neurotoxins / Eds. Varfolomeev S.D., Efremenko E.N. 1st ed.; Moscow: RIOR, 2020. 380 p. <https://doi.org/10.29039/02026-5> (in Russian).

2. Mukherjee S., Gupta R.D. Organophosphorus nerve agents: types, toxicity, and treatments // J. Toxicology. 2020. Article ID 3007984. <https://doi.org/10.1155/2020/3007984>

3. Лягин И.В., Ефременко Е.Н. Ферменты и их формы, используемые для обнаружения фосфорорганических соединений // Вестник войск РХБ защиты. 2021. Т. 5, № 1. С. 22–41. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-22-41>

Lyagin I.V., Efremenko E.N. Enzymes and

their forms used in detection of organophosphorus compounds // Journal of NBC Protection Corps. 2021. V. 5. № 1. P. 22–41. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-22-41> (in Russian).

4. Greer J.B., Magnuson J.T., Hester K. et al. Effects of chlorpyrifos on cholinesterase and serine lipase activities and lipid metabolism in brains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // Toxicol. Sci. 2019. V. 172. P. 146–154. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfz167>

5. Liu L., Koo Y., Akwitti C. et al. Three-dimensional (3D) brain microphysiological system for organophosphates and neurochemical agent toxicity screening // PLoS ONE. 2019. V. 14. P. e0224657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224657>

6. Brenet A., Somkhit J., Hassan-Abdi R. et al. Organophosphorus diisopropylfluorophosphate (DFP) intoxication in zebrafish larvae causes behavioral

defects, neuronal hyperexcitation and neuronal death // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. e19228. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76056-8>

7. Hogberg H.T., de Cássia da Silveira E Sá R., Kleinsang A. et al. Organophosphorus flame retardants are developmental neurotoxicants in a rat primary brainsphere in vitro model // *Arch. Toxicol.* 2021. V. 95. P. 207–228. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02903-2>

8. Carr R.L., Alugubelly N., de Leon K. et al. Inhibition of fatty acid amide hydrolase by chlorpyrifos in juvenile rats results in altered exploratory and social behavior as adolescents // *Neurotoxicology.* 2020. V. 77. P. 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2020.01.002>

9. Супотницкий М.В. Химическое оружие в ирано-иракской войне 1980–1988 годов. 6. Накопленный опыт лечения поражений отравляющими веществами нервно-паралитического действия // *Вестник войск РХБ защиты.* 2022. Т. 6. № 1. С. 65–82. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-65-82>

Supotnitskiy M.V. Chemical weapons in the Iran-Iraq war (1980–1988). 6. Accumulated experience in the treatment of lesions with poisonous nerve agents // *Journal of NBC Protection Corps.* 2022. V. 6. № 1. P. 65–82. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-65-82> (in Russian).

10. Quak I., Brouns M.R., van de Bor M. The dynamics of autism spectrum disorders: how neurotoxic compounds and neurotransmitters interact // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2013. V. 10. P. 3384–3408. <https://doi.org/10.3390/ijerph10083384>

11. Han, S.W., Shin, J.S. Aromatic L-amino acid decarboxylases: mechanistic features and microbial applications // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2022. V. 106. P. 4445–4458. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12028-4>

12. Bertoldi, M. Mammalian dopa decarboxylase: structure, catalytic activity and inhibition // *Arch. Biochem. Biophys.* 2014. V. 546. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.12.020>

13. Shan L., Bao A.M., Swaab D.F. Changes in histidine decarboxylase, histamine N-methyltransferase and histamine receptors in neuropsychiatric disorders // In: *Histamine and Histamine Receptors in Health and Disease. Handbook of Experiment. Pharmacology.* V. 241 / Eds. Hattori Y., Seifert R. Cham, Switzerland: Springer, 2017. P. 259–276. https://doi.org/10.1007/164_2016_125

14. Dade M., Berzero G., Izquierdo C. et al. Neurological syndromes associated with Anti-GAD antibodies // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. P. e3701. <https://doi.org/10.3390/ijms21103701>

15. Martin D.L., Martin S.B., Wu S.J., Espina N. Cofactor interactions and the regulation of glutamate decarboxylase activity // *Neurochem. Res.* 1991. V. 16. № 3. P. 243–249. <https://doi.org/10.1007/BF00966087>

16. Giardina G., Montioli R., Gianni S. et al. Open conformation of human DOPA decarboxylase reveals the mechanism of PLP addition to Group II decarboxylases // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2011. V. 108. P. 20514–20519. <https://doi.org/10.1073/pnas.1111456108>

17. Aslanli A., Lyagin I., Stepanov N. et al. Bacterial cellulose containing combinations of antimicrobial peptides with various QQ enzymes as a prototype of an ‘enhanced antibacterial’ dressing: In silico and in vitro data // *Pharmaceutics.* 2020. V. 12. P. e1155. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12121155>

18. Aslanli A., Lyagin I., Efremenko E. Charges’ interaction in polyelectrolyte (nano)complexing of His6-OPH with peptides: Unpredictable results due to imperfect or useless concept? // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 140. P. 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.137>

19. Lyagin I., Efremenko E. Theoretical evaluation of suspected enzymatic hydrolysis of Novichok agents // *Catal. Commun.* 2019. V. 120. P. 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2018.11.019>

20. Harvey S.P., McMahon L.R., Berg F.J. Hydrolysis and enzymatic degradation of Novichok nerve agents // *Heliyon.* 2020. V. 6. P. e03153. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03153>

21. Nepovimova E., Kuca K. Chemical warfare agent NOVICHOK – mini-review of available data // *Food Chem. Toxicol.* 2018. V. 121. P. 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.09.015>

22. Hrvat N.M., Kovarik Z. Counteracting poisoning with chemical warfare nerve agents // *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 2020. V. 71. P. 266–284. <https://doi.org/10.2478/aiht-2020-71-3459>

23. Aslanli A., Lyagin I., Efremenko E. Decarboxylases as hypothetical targets for actions of organophosphates: Molecular modeling for prediction of hidden and unexpected health threats // *Food Chem. Toxicol.* 2022. V. 161. P. 112856. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.112856>

24. Lyagin I., Efremenko E. Enzymes, reacting with organophosphorus compounds as detoxifiers: Diversity and functions // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22. P. e1761. <https://doi.org/10.3390/ijms22041761>

25. Efremenko E.N., Lyagin I.V., Klyachko N.L. et al. A simple and highly effective catalytic nanozyme scavenger for organophosphorus neurotoxins // *J. Control Release.* 2017. V. 247. P. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.12.037>

26. Nandi N.K., Vyas A., Akhtar Md. J., Kumar B. The growing concern of chlorpyrifos exposures on human and environmental health // *Pesticide Biochem. Physiol.* 2022. V. 185. P. 105138. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105138>

27. Tarazona J., Court M.D., Tiramani M. et al. Glyphosate toxicity and carcinogenicity: a review of the scientific basis of the European Union assessment and its differences with IARC // *Arch. Toxicol.* 2017. V. 91. P. 2723–2743. <https://doi.org/10.1007/s00204-017-1962-5>

28. Costas-Ferreira C., Durán R., Faro L. Toxic effects of glyphosate on the nervous system: a systematic review // *Intern. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23. P. 4605. <https://doi.org/10.3390/ijms23094605>

29. Norrrahim M.N.F., Razak M.A.I.A., Shah N.A.A. et al. Recent developments on oximes to improve the

blood brain barrier penetration for the treatment of organophosphorus poisoning: a review // RSC Adv. 2020. V. 10. P. 4465–4489. <https://doi.org/10.1039/c9ra08599h>

30. Kaur S., Singh S., Jaiswal G. et al. Pharmacology of dopamine and its receptors // In: *Frontiers in Pharmacology of Neurotransmitters* / Eds. Kumar P., Deb P.K. Singapore: Springer, 2020. Chapter 5, P. 143–182. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3556-7_5

31. Speranza L., di Porzio U., Viggiano D. et al. Dopamine: the neuromodulator of long-term synaptic plasticity, reward and movement control // *Cells*. 2021. V. 10. P. e735. <https://doi.org/10.3390/cells10040735>

32. Moya-García A.A., Pino-Ángeles A., Gil-Redondo R. et al. Structural features of mammalian histidine decarboxylase reveal the basis for specific inhibition // *Br. J. Pharmacol.* 2009. V. 157. P. 4–13. <https://doi.org/10.1111/j.1476-5381.2009.00219.x>

33. Han, SW., Shin, JS. Aromatic L-amino acid

decarboxylases: mechanistic features and microbial applications // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2022. V. 106. P. 4445–4458. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12028-4>

34. Jiang M, Xu G, Ni J. et al. Improving soluble expression of tyrosine decarboxylase from *Lactobacillus brevis* for tyramine synthesis with high total turnover number // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2019. V. 188. P. 436–449. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2925-x>

35. Choi Y., Han S.-W., Kim J.-S. et al. Biochemical characterization and synthetic application of aromatic L-amino acid decarboxylase from *Bacillus atrophaeus* // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2021. V. 105. P. 2775–2785. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11122-3>

36. Nakagawa A., Nakamura S., Matsumura E. et al. Selection of the optimal tyrosine hydroxylation enzyme for (S)-reticuline production in *Escherichia coli* // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2021. V. 105. P. 5433–5447. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11401-z>

Об авторах

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3.

Ефременко Елена Николаевна. Зав. лабораторией, доктор биол. наук, профессор, заведующий лабораторией экибиокатализа, выполняющей госзадание.

Асланлы Айсель Гюльхан. Научный сотрудник, канд. хим. наук, сотрудник лаборатории экибиокатализа, выполняющей госзадание.

Лягин Илья Владимирович. Старший научный сотрудник, канд. хим. наук, сотрудник лаборатории экибиокатализа, выполняющей госзадание.

Контактная информация для всех авторов: elena_efremenko@list.ru

Контактное лицо: Ефременко Елена Николаевна, elena_efremenko@list.ru

New Enzymatic Targets for Organophosphorus Compounds

E.N. Efremenko, A.G. Aslanli, I.V. Lyagin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry. Lenin Hills 1-3, Moscow 119991, Russian Federation

Received 12 July 2022. Accepted 27 September 2022.

It is known that several decarboxylases (aromatic amino acid decarboxylase (AAD), histidine decarboxylase (HD) and glutamate decarboxylase (GD) with different molecular weights catalyze the most important reactions of neurotransmitter and neuromodulator biosynthesis. Pyridoxal phosphate, which serves as a cofactor for these enzymes, is one of organophosphorus compounds (OPC) having a structure similar to highly toxic substances such as warfare agents (WA) sarin, soman, Vx, a substance of type Vx, tabun and the so-called «Novichoks» (A230, A232, A234), as well as pesticides, widely used in agriculture (chlorpyrifos, malathion, glyphosate, mipafox, diazinon, paraoxon), based on their inhibitory effect on cholinesterases (ChE). *The purpose of this work* was to use computer modeling methods to evaluate the possible binding of various OPC to the catalytic centers of these enzymes instead of a cofactor, as well as similar interactions of decarboxylases (DC) with OPC when the active centers of DC already contain a built-in cofactor. Molecular docking has shown that a number of these OPC can compete with the cofactor for binding to the active centers of DC, and absolutely all the studied OPC (pesticides and WA) create obstacles to embedding the cofactor in the active center of AAD and HD. Such interactions will lead to a decrease in the level of formation of products of the corresponding catalytic reactions (dopamine, serotonin,

phenylethylamine, serotonin, γ -aminobutyric acid) and the manifestation of their physiological functions. It was found that in the presence of a cofactor in the active center of the studied DC, the interaction of a number of OPC with the surface of these enzymes near the active center increases and exceeds the strength of the interaction of same enzymes with their typical substrates. At the same time, the maximum interaction that can lead to a significant inactivation of all the studied DC was revealed for the pesticides, while the effect of their presence was lower for WA. One of the highest levels of possible influence on the activity of DC was revealed for chlorpyrifos and diazinon. In total, for DC, the more dangerous substances with high potential neurotoxicity turned out to be not WA at all, including «Novichoks», namely pesticides, which, according to their known effect on ChE, are considered as low-toxic OPC. The conducted new theoretical studies indicate that, firstly, direct experimental studies are required that will confirm the bioinformatics calculations made; secondly, a revision of long-standing approaches to assessing the neurotoxicity of various OPC, based mainly on the use of ChE for these purposes, is necessary; thirdly, it may be necessary to formulate tasks for the development and the use of new systems for the determination of potentially neurotoxic substances, the effect of which will be based on the use of different DC; fourth, to study the possible using DC as a basis for the development of new catalytic enzymatic detoxifiers (antidotes) and CNS regenerators.

Keywords: *chemical safety; computer modeling; decarboxylases; inhibitors; neurodegenerative diseases; organophosphorus compounds; pesticides; pyridoxal phosphate; warfare agents.*

For citation: *Efremenko E.N., Aslanli A.G., Lyagin I.V. New Enzymatic Targets for Organophosphorus Compounds // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6. No 4. P. 342–354. EDN: DMKJOE. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-342-354>*

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. The work was prepared in the performance of the State Assignment of Lomonosov Moscow State University No. 121041500039-8.

References

See P. 351–353.

Authors

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry. Lenin Hills 1-3, Moscow 119991, Russian Federation.

Elena Nikolayevna Efremenko. Chief of the laboratory of ecobiocatalysis. Doctor of Biological Sciences, Professor. Carrying out the state task.

Ajsel' Gjul'han Aslanly. Researcher. Candidate of Chemical Sciences. Employee of the laboratory of ecobiocatalysis, performing a state assignment.

Ilya Vladimirovich Lyagin. Senior Researcher. Candidate of Chemical Sciences. Employee of the laboratory of ecobiocatalysis, performing a state assignment.

Contact information for all authors: elena_efremenko@list.ru

Contact person: Elena Nikolayevna Efremenko; elena_efremenko@list.ru



Применение современных технических средств химической разведки и контроля для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ

В.А. Иноземцев, И.Н. Ефимов, А.А. Позвонков, А.С. Самородов,
В.Н. Пономарев, С.С. Колбинев

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт»
Министерства обороны Российской Федерации,
412918, Российская Федерация, г. Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1

Поступила 27.09.2022 г. Исправленный вариант 25.11.2022 г. Принята к публикации 23.12.2022 г.

Анализ возможностей современных образцов технических средств химической разведки и специального оборудования комплексов химического контроля свидетельствует о принципиальной возможности оперативного обнаружения минно-взрывных устройств (МВУ) путем идентификации входящих в состав МВУ взрывчатых веществ и сопутствующих технологических примесей. *Цель работы* – анализ возможностей применения современных технических средств химической разведки и контроля для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ. Для достижения данной цели проводилась оценка аналитических характеристик и конструктивных особенностей технических средств химической разведки и реализованных в них методов индикации для определения возможности обнаружения и идентификации компонентов МВУ в различном агрегатном состоянии. В рамках статьи показана возможность использования специальных войсковых газосигнализаторов, функционирующих на основе метода спектрометрии ионной подвижности (СИП), для подтверждения факта присутствия паровой фазы взрывчатых веществ и сопутствующих им объектов индикации. Оценка проведена на основании анализа физико-химических свойств пероксидов и азотсодержащих взрывчатых веществ и сравнения достижимых концентраций паровой фазы азотсодержащих взрывчатых веществ (тротил, гексоген, пентрит, нитроглицерин, динитротолуол) с результатами расчетной чувствительности метода СИП (~10-10 мг/л). Установлено, что следовые количества взрывчатых веществ в жидком и твердом агрегатных состояниях могут быть идентифицированы портативными техническими средствами химического контроля, функционирующими на основе методов инфракрасной Фурье-спектроскопии и комбинационного рассеяния света. Предложены пути расширения функциональных возможностей данных технических средств за счет создания специализированных баз спектральных данных взрывчатых веществ и сопутствующих технологических примесей. Включение дополнительного банка спектров в управляющее программное обеспечение СИП-газосигнализаторов необходимо совместить с реализацией возможности программного выбора режимов работы и переключения баз данных оператором.

Ключевые слова: взрывчатое вещество; газосигнализатор; комбинационное рассеяние света; объект индикации; спектрометрия ионной подвижности; технические средства химической разведки; химическая разведка.

Библиографическое описание: Иноземцев В.А., Ефимов И.Н., Позвонков А.А., Самородов А.С., Пономарев В.Н., Колбинев С.С. Применение современных технических средств химической разведки и контроля для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ // Вестник РХБ защиты. 2022. Т. 6. № 3. С. 355–364. EDN: DVOLJH. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-355-364>

Основными средствами террора в его классическом понимании исторически являлись применение огнестрельного оружия и

минно-взрывные устройства (МВУ). Использование для террористических целей боевых отравляющих веществ или промышленных ток-

сичных химикатов – новая и крайне опасная форма терроризма. Доступность специфичных, а в недалеком прошлом закрытых сведений по изготовлению в домашних условиях самодельных взрывных устройств, в том числе в снаряжении токсичными химическими веществами, значительно повышает вероятность применения токсичных химических веществ в террористических целях. Подтверждают возможность совместного применения отравляющих и взрывчатых веществ и действия незаконных вооруженных формирований на территории Сирийской Арабской Республики. Общественный резонанс и устрашающий для гражданского населения эффект использования МВУ в снаряжении токсичными химическими веществами делает их применение в рамках террористической деятельности предпочтительнее традиционных вооружений [1, 2].

Развитие форм террористической деятельности с применением взрывчатых веществ и возможные последствия актов химического терроризма требуют принятия соответствующих защитных мер, в том числе проведения химического мониторинга для обеспечения химической безопасности личного состава военизированных формирований и мирного гражданского населения, как до совершения террористического акта, так и пост фактум. Очевидно, что контроль химической обстановки после террористического акта, закончившегося выбросом токсичных химикатов в окружающую среду, может быть проведен с использованием штатных технических средств химической разведки и контроля. В то же время проведение превентивного обследования химически опасных объектов, которые могут оказаться МВУ, представляет собой сложную задачу. Практика привлечения специалистов войск РХБ защиты для работы в составе экспертных групп по обследованию мест предполагаемого изготовления химических боеприпасов в Сирийской Арабской Республике и определению возможности безопасной работы в районах применения химического оружия обуславливает необходимость определения опасности применения МВУ как с целевым, так и с химическим снаряжением.

Цель работы – оценка аналитических и конструктивных возможностей технических средств химической разведки и реализованных в них методов индикации для определения возможности обнаружения и идентификации компонентов МВУ в различном агрегатном состоянии.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- анализ физико-химических и спектральных характеристик основных взрыв-

- чатых веществ и сопутствующих технологических примесей;

- определение возможности обнаружения и идентификации объектов индикации техническими средствами химической разведки и контроля, функционирующими на основе методов фурье-спектрометрии, спектрометрии ионной подвижности и комбинационного рассеяния света.

Анализ потенциальных объектов индикации. При поиске МВУ и зарядов взрывчатых веществ объектами обнаружения для технических средств химической разведки и контроля могут являться пары и твердые частицы веществ, входящих в состав этих объектов: собственно взрывчатые вещества, маркирующие вещества, технологические примеси, пластификаторы и продукты деструкции взрывчатых веществ. Общую задачу по обнаружению взрывчатых веществ можно разделить на две основные составляющие: обнаружение взрывчатых и сопутствующих им веществ по паровой фазе, а также анализ твердых частиц, визуально наблюдаемых на поверхности, вблизи предположительного нахождения взрывных устройств.

По составу основные действующие компоненты взрывчатых веществ можно разделить на два основных класса: не имеющие нитро/нитратных групп или содержащие хотя бы одну из них. В первом случае взрывчатые вещества принадлежат к пероксидам, перхлоратам или азидам. Наиболее широко представлен класс азотсодержащих взрывчатых веществ (TNT – тротил, RDX – гексоген, PETN – пентрит, селитры, нитроглицерин и др.), в состав которых, помимо азота, входят водород, углерод и кислород [3–5]. Общим свойством веществ второго класса является существенное превышение содержания в их молекулах атомов азота и кислорода по сравнению с количеством углерода и водорода, при этом относительное содержание в них азота на порядок выше, чем для обычных материалов, например шелка, полиуретана, нейлона и т.п.

Анализируя перечень взрывчатых веществ, подлежащих идентификации, их физико-химические свойства и особенности их применения, следует отметить ряд ключевых особенностей. Высокая молярная масса химических соединений, входящих в состав взрывчатых веществ, и, как следствие, чрезвычайно низкое давление паров большинства взрывчатых веществ, определяющее их концентрацию в воздухе. В частности, равновесное давление паров при температуре 25 °С для тринитротолуола составляет величину 9 ppb ($\sim 1,7 \times 10^{-3}$ Па), а для гексогена – 6 ppt ($\sim 4,6 \times 10^{-6}$ Па) [6]. При этом несложные приемы укрытия взрывчатых веществ путем помещения их, например, в пластиковую

Таблица 1 – Концентрации насыщенных паров взрывчатых веществ [9]*

| Взрывчатое вещество | Молярная масса, г/ моль | $C_{25^{\circ}\text{C}}$, ppb | $C_{25^{\circ}\text{C}}$, мг/л |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| TNT (тротил) | 227 | 9,1 | 0,1 |
| RDX (гексоген) | 222 | $5,7 \times 10^{-3}$ | $5,7 \times 10^{-5}$ |
| HMX (октоген) | 296 | $4,4 \times 10^{-8}$ | $2,6 \times 10^{-9}$ |
| NG (нитроглицерин) | 227 | 580 | 5,9 |
| AN (аммиачная селитра) | 80 | 12 | $4,3 \times 10^{-2}$ |
| PETN (пентрит) | 316 | $7,1 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-4}$ |
| TNA (тринитроанилин) | 228 | $2,2 \times 10^{-2}$ | $2,2 \times 10^{-4}$ |
| TNB (тринитробензол) | 213 | 4,1 | $3,9 \times 10^{-2}$ |
| TATP (триацетона трипероксид) | 222 | $4,3 \times 10^4$ | 42 |
| 2,4-DNT (динитротолуол) | 182 | 280 | 2,2 |

* Для пересчета ppb в значения массовой концентрации использовалось соотношение $C_{25^{\circ}\text{C}} \text{ мг/л} = 4,5 \times 10^{-5} \mu \cdot C_{25^{\circ}\text{C}} \text{ ppb}$, где μ - молярная масса вещества, г/моль

упаковку, уменьшают давление паров еще на три порядка [4, 7]. Кроме того, концентрация пара резко падает с увеличением расстояния от поверхности источника, что вызвано конвективным рассеянием пара и необратимой сорбцией взрывчатых и сопутствующих им веществ на окружающих предметах.

В пользу перспектив обнаружения взрывчатых устройств по паровой фазе свидетельствует наличие в составе взрывчатых рецептур веществ с относительно высоким давлением паров. Например, в работе [8] показано, что при анализе воздушной пробы над зарядом пластита С-4 пары гексогена, являющиеся основным компонентом этой смеси, труднообнаружимы, при этом в пробе зарегистрированы пары 2-этил-1-гексанола. Для ряда веществ со сравнительно малым по массе содержанием летучих примесей в паровой фазе присутствуют высокие концентрации этих примесей, как, например, в случае 2,4-ДНТ – технологической примеси тротила в зарядах военного

назначения. Данные по концентрациям насыщенных паров взрывчатых веществ в равновесных двухфазных системах при температуре 25°C приведены в таблице 1.

Концентрации паров взрывчатых веществ, приведенные в таблице 1, в целом, находятся в диапазоне от единиц до 10^{-5} мг/л, что соответствует диапазону обнаруживаемых парогазовых концентраций объектов индикации технических средств химической разведки и контроля. Такие вещества, как гексоген и октоген, с учетом необходимости превентивной идентификации объекта на предмет его взрыво- или химической опасности, без вскрытия его оболочки или упаковки, обуславливают достаточно жесткие требования к методам и средствам их индикации по чувствительности обнаружения паров (на уровне 10^{-5} – 10^{-10} мг/л). Из существующего парка технических средств химической разведки и контроля, с учетом требований по чувствительности и количеству объектов индикации в базе



Рисунок 1 – Внешний вид и лицевая панель автоматического газосигнализатора ГСА-5 (фотографии из архива ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России)



Рисунок 2 – Автоматический газосигнализатор носимый ГС-Н из состава специального оборудования машин РХБ разведки РХМ-8 и РХМ-9 (фотографии из архива ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России)

данных (~10–15 единиц), для оперативного обнаружения и идентификации следовых количеств взрывчатых веществ наиболее применимы газосигнализаторы, функционирующие на основе метода спектрометрии ионной подвижности. Такие высокие аналитические характеристики, демонстрируемые при обнаружении отравляющих веществ современными газосигнализаторами (спектрометрами ионной подвижности), как специфичность, разрешение и чувствительность, подтверждают, что применение данных технических средств будет являться эффективным при обнаружении взрывных устройств и зарядов взрывчатых веществ по паровой фазе объекта индикации.

Оценка возможностей применения отечественных и зарубежных технических средств для обнаружения взрывчатых веществ. Основным техническим средством химической разведки, состоящим на снабжении ВС РФ, функционирующим на основе метода спектрометрии ионной подвижности, является автоматический газосигнализатор ГСА-5 (рисунок 1). С принятием на снабжение ВС РФ специального автоматического газосигнализатора ГСА-5 войска РХБ защиты впервые получили прибор, позволяющий проводить химический контроль воздушной среды и определять зараженность поверхностей вооружения, военной специальной техники отравляющими веществами типа V-газы, зоман, иприт с целью определения необходимости проведения мероприятий специальной обработки. Прибор также позволяет обнаруживать пары V-газов, зомана, зарина, иприта и аэрозоль CS и CR в воздухе в опасных и малоопасных кон-

центрациях¹. Информация об обнаружении выводится на жидкокристаллический дисплей в виде названий веществ и степени опасности их концентраций.

Дальнейшее совершенствование приборов химической разведки и контроля, реализующих технологию спектрометрии ионной подвижности, проводилось в рамках разработки машин РХБ разведки РХМ-8 и РХМ-9. В ходе данной опытно-конструкторской работы создана принципиально новая линейка автоматических газосигнализаторов стационарного и автономного использования, в частности, газосигнализатор автоматический носимый ГС-Н, предназначенный для периодического контроля воздуха с целью обнаружения в нем паров токсичных химикатов и сильнодействующих ядовитых веществ (рисунок 2).

В качестве источника ионизации в ионно-дрейфовых трубках ГСА-5 и ГС-Н используется бета-источник на основе радиоизотопа ⁶³Ni. При практически идентичной чувствительности по основным объектам индикации и удовлетворительной специфичности база спектральных данных газосигнализатора ГС-Н увеличена до 15 обнаруживаемых веществ².

Перечень обнаруживаемых прибором ГС-Н веществ включает в себя основные ТХ нервно-паралитического, кожно-нарывного, общеядовитого и удушающего действия, ирританты, ряд сильнодействующих ядовитых веществ и компонентов ракетного топлива. Расширение перечня обнаруживаемых веществ стало возможным за счет использования усовершенствованного алгоритма обработки спектральной информации, а также двух основных

¹ Приказ Министра обороны Российской Федерации от 2008 г. № 65 «О принятии на снабжение ВС РФ автоматического газосигнализатора общевойскового ГСА-5».

² Газосигнализатор специальный носимый ГС-Н. Руководство по эксплуатации ИЮВТ.413442.018 РЭ. Тула: ЗАО «Спецприбор», 2020. 49 с.

Таблица 2 – Расчетная чувствительность метода спектрометрии ионной подвижности по обнаружению взрывчатых веществ [12]

| Взрывчатое вещество | $C_{обн.}$, мг/л |
|-------------------------|---------------------|
| TNT (тротил) | 8×10^{-10} |
| PETN (пентрит) | 1×10^{-9} |
| RDX (гексаген) | 3×10^{-9} |
| NG (нитроглицерин) | 5×10^{-10} |
| 2,4-ДНТ (динитротолуол) | 2×10^{-9} |

конструктивных доработок: реализации двухмодовой системы регистрации ионов в положительной и отрицательной полярностях и внедрения системы формирования нового ион-реагента с помощью автоматического ввода допанта в зону ионизации.

Дальнейшее расширение банка спектральных данных прибора за счет пополнения его спектрами взрывчатых и сопутствующих веществ приведет к перенасыщению базы данных, и, как следствие, к ухудшению специфичности и увеличению числа ложных срабатываний прибора при его функционировании [10, 11]. Для одновременного определения отравляющих и взрывчатых веществ наиболее целесообразным представляется введение дополнительного режима функционирования газосигнализатора, предназначенного для обнаружения наличия МВУ и следовых количеств взрывчатых веществ. Данный режим должен предусматривать работу по отдельной базе спектральных данных взрывчатых веществ и их маркерных технологических примесей. Принимая во внимание априорно меньшую токсичность взрывчатых веществ, в сравнении с токсичными химикатами, в дополнительном режиме работы прибора не потребуется быстрого действия на уровне единиц секунд. Для улучшения чувствительности обнаружения в данном дополнительном режиме целесообразно реализовать возможность накопления полезного сигнала. Следует отметить, что подобная модернизация технических средств химической разведки, функционирующих на основе метода спектрометрии ионной подвижности, направленная на расширение перечня решаемых задач, может быть проведена на программном уровне, без конструктивных доработок.

Анализ зарубежных информационных материалов об обнаружении взрывчатых веществ с использованием времяпролетных спектрометров ионной подвижности с источниками ионизации, аналогичными используемым в составе автоматических газосигнализаторов ГСА-5 и ГС-Н, показывает принципиальную возможность обнаружения паров взрывчатых веществ данными техническими средствами

[5]. В таблице 2 приведены значения рассчитанных пределов обнаружения взрывчатых веществ с использованием времяпролетных спектрометров [9].

Сравнение данных, приведенных в таблицах 1, 2, показывает, что спектрометр ионной подвижности теоретически позволяет обнаружить пары взрывчатых веществ, например, TNT в концентрации в 10^4 – 10^5 раз меньше, чем давление насыщенного пара этих веществ, а следовые количества гексогена – в 10^3 раз меньше, чем вес типичного отпечатка пальца [6].

Второй составляющей задачи по обнаружению взрывчатых веществ является обнаружение взрывчатых и сопутствующих им веществ по результатам анализа твердых частиц, визуально наблюдаемых на поверхности возле предположительного места нахождения взрывных устройств. Большинство взрывчатых веществ достаточно прочно связываются силами адгезии с материалами, обладающими высоким значением поверхностной энергии, такими, как металлы и их окислы [13]. Поэтому, даже при аккуратном обращении со взрывчатыми веществами, трудно избежать переноса частиц взрывчатых веществ на поверхность. Например, количество взрывчатого вещества, оставляемого первым отпечатком пальца на поверхности предметов, составляет около 100 мкг. В случае использования гексогена одно зерно размером 0,5 мм, имея массу 100 мкг, содержит $\sim 3 \times 10^{17}$ молекул, что подтверждает возможность обнаруживать твердые частицы объекта индикации, при условии перевода его из конденсированного состояния в газообразное.

Принимая во внимание возможность обнаружения взрывчатых веществ спектрометрами ионной подвижности, рассмотрим возможность обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ другими методами индикации.

Наличие в составе взрывчатых веществ нитро/нитратных групп, а также структурных связей С-Н и С-N, как и в случае большинства сложных химических соединений, обеспечивает спектрам поглощения молекул взрывчатых веществ высокую специфичность и наличие



Рисунок 3 – Мобильный комплекс химического контроля МКХК (фотографии из архива ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России)

характеристических спектральных линий в средней инфракрасной области от 2500 см^{-1} до 800 см^{-1} (от 4 до 12 мкм) [14]. Данное обстоятельство обуславливает возможность обнаружения взрывчатых веществ на различных поверхностях, в том числе удаленных от МВУ и подвергшихся случайному контакту с взрывчатыми веществами, с использованием высокоинформативных спектрометрических методов, таких как инфракрасная фурье-спектрометрия и рамановская спектрометрия [15–18]. К достоинствам данных методов следует отнести высокую селективность анализа, возможность обнаружения и идентификации веществ в многокомпонентных смесях, а также возможность реализации метода в портативных технических средствах. Основным недостатком методов является относительно слабая (в сравнении с методом спектрометрии ионной подвижности) чувствительность обнаружения, требующая визуализации объекта индикации.

Практический опыт обнаружения и идентификации взрывчатых веществ по твердой фазе с применением спектрометрических методов анализа получен авторами статьи в ходе участия в проведении мероприятий специального химического контроля при обезвреживании схрона с артиллерийскими боеприпасами времен Второй мировой войны на острове Сахалин. Априорная информация о снаряжении боеприпасов отсутствовала, косвенные признаки (калибр, маркировка) позволяли полагать наличие в боеприпасах отравляющих веществ. Проведенные мероприятия и использование в качестве средства объективного химического контроля портативного спектрометра комбинационного рассеяния света позволили безошибочно определить тип снаряжения боеприпаса, установить тип основ-

ного взрывчатого вещества (тринитротолуол) и вещества, используемого в качестве промежуточного детонатора (пикриновая кислота).

Практика привлечения специалистов организаций и частей центрального подчинения войск РХБ защиты для обеспечения РХБ безопасности при подготовке и в ходе проведения различных международных форумов и крупных спортивных мероприятий обусловила оснащение войск РХБ защиты современными техническими средствами и специальным оборудованием [19]. За истекшее десятилетие в эксплуатацию был введен мобильный комплекс оценки обстановки при ликвидации последствий аварий на химически опасных объектах МКХК (рисунок 3), оснащенный современными техническими средствами химической разведки и контроля, в том числе и зарубежного производства [20–22]. Создано специальное подразделение, со штатом специализированных (для решения задач РХБ разведки и контроля) подвижных лабораторий КМ РХБР, оснащенных схожей с МКХК номенклатурой современного аналитического оборудования.

Рассмотрим подробнее приборы из состава мобильных комплексов, которые могут быть использованы для обследования взрывных устройств как с целевым, так и с химическим снаряжением. К данным техническим средствам относятся портативные приборы разработки компании «Thermo Scientific»: фурье- и рамановского (комбинационного рассеяния света) спектрометров для внелабораторного анализа химических веществ и смесей – TruDefender FT и FirstDefender³.

Данные типы технических средств предполагают прямой оптический контакт с анализируемым веществом, находящемся в твердом или жидком состоянии. В кон-

³ Комплекс мобильный химического контроля МКХК. Техническое описание ДКТЦ.418400.000.00 ТО. СПб: НПП «Адвент», 2012. 35 с.

струкции TruDefender FT применен классический интерферометр Майкельсона с пьезоэлектрическим широкополосным фотоприемником. Рабочий диапазон спектра – 650–4000 см⁻¹, спектральное разрешение – 4 см⁻¹. Размер изделия – 196×112×53 мм при массе менее 1,4 кг. Ион-литиевый аккумулятор обеспечивает непрерывную работу прибора в течение 2 часов.

Прибор позволяет анализировать вещества, находящиеся в капельно-жидком состоянии на поверхности предметов, твердые частицы с размерами ~ 1±2 мм, смывы с поверхностей. Методика измерений спектров анализируемых соединений основана на эффекте нарушения полного внутреннего отражения. Данная методика стандартно применяется в исследовательской практике для диагностики веществ с очень большими коэффициентами поглощения в рабочем диапазоне спектра для получения интерпретируемых спектральных зависимостей для оптически непрозрачных материалов.

Прибор FirstDefender представляет собой спектрометр комбинационного рассеяния света. В качестве источника подсветки используется лазерный излучатель мощностью 300 мВт с длиной волны 785±0,5 нм, при помощи которого происходит исследование объекта. Оптический диапазон спектра комбинационного рассеяния света – 250–2875 см⁻¹ при спектральном разрешении 7–10 см⁻¹. Разрешение спектрометра FirstDefender в разы хуже, чем TruDefender FT, но это окупается возможностью наблюдения спектральных линий оптически запрещенных переходов в молекулах. Габариты спектрометра комбинационного рассеяния составляют 300×150×76 мм при массе менее 1,8 кг.

Анализ объектов индикации с использованием прибора FirstDefender может производиться в кюветном отделении в виале, либо при наведении лазерного пучка на объект индикации на расстоянии 10–20 мм (в том числе и при нахождении веществ в стеклянной и прозрачной пластиковой упаковке), либо с использованием оптоволоконного зонда для труднодоступных поверхностей. За уникальную информативность метода комбинационного рассеяния приходится расплачиваться его низкой чувствительностью, что позволяет использовать его для анализа только визуально различимых объектов индикации в относительно больших объемах анализируемых проб (≥100 мг).

Выводы

Проведенный анализ технических средств химической разведки, специального оборудования комплексов химического контроля и реализованных в них методов индикации применительно к задаче обнаружения взрывчатых веществ и МВУ позволил сделать вывод о возможности ее выполнения с использованием специальных войсковых газосигнализаторов, функционирующих на основе метода спектрометрии ионной подвижности. Подобное расширение функциональных возможностей данных технических средств, без ущерба их основному назначению, может быть достигнуто при условии их программной и конструктивной доработки, заключающейся в создании и интеграции специализированной базы спектральных данных. Портативное спектральное оборудование из состава мобильных комплексов химического контроля может быть использовано для подтверждения факта присутствия токсичных химикатов либо МВУ и сопутствующих им объектов индикации.

Вклад авторов / Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Финансирование. Федеральное государственное бюджетное учреждение «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Министерства обороны Российской Федерации.

Список источников / References

1. Ковтун В.А., Голипад А.Н., Мосин Н.И. и др. Химический терроризм как силовой инструмент проведения внешней политики США и стран Запада // Вестник войск РХБ защиты. 2017. Т. 1. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-2-3-13>
2. Kovtun V.A., Golipad A.N., Mosin N.I. et al. Chemical terrorism as power tool for conducting the foreign policy of the United States and Western countries // Journal of NBC Protection Corps. 2017. V. 1. № 2. P. 3–13. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-2-3-13> (in Russian).
3. Смирнов Н.А. Информационная война в Сирии // Вестник МГИМО-Университета. 2015. № 1. С. 153–160. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2015-1-40-153-160>
4. Smirnov N.A. Information war in Syria // MGIMO Bulltin. 2015. № 1. P. 153–160 <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2015-1-40-153-160> (in Russian).
5. Скворцов Л.А., Максимов Е.М. Применение лазерной фототермической спектроскопии для standoff детектирования следов взрывчатых веществ на поверхности тел // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 7. С. 565–578. <https://doi.org/10.1070/QE2010v040n07ABEH014334>
6. Skvortsov L.A., Maksimov E.M. Application of laser photothermal spectroscopy for standoff detection of trace explosive residues on surfaces // Quantum Electron. 2010. V. 40. № 7. P. 565–578. <https://doi.org/10.1070/QE2010v040n07ABEH014334> (in Russian).
7. Gottfried J.L., De Lucia F.C., Munson C.A., McNesby K. (ed) Laser-induced breakdown spectroscopy for detection of explosive residues // Anal. Bioanal. Chem. 2009. V. 395. P. 283–300. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2802-0>
8. Dionne B.C., Rounbehler D.P., Achter E.K., Fine D.H. Vapor pressure of explosives // Journal of Energetic Materials, 1986. V. 4. № 1-4. P. 447–472. <https://dx.doi.org/10.1080/07370658608011353>
9. Скворцов Л.А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 208 с. ISBN 978-5-94836-387-5
10. Skvortsov L.A. Laser methods of remote detection of chemical compounds on the surface of bodies. Moscow: TECHNOSPHERE, 2015. 208 p. ISBN 978-5-94836-387-5 (in Russian).
11. Kolla P. The application of analytical methods to the detection of hidden explosives and explosive devices // Andewandte Chemie. 1997. V. 36. P. 800. <https://doi.org/10.1002/anie.199708001>
12. Буряков И.А. Обнаружение взрывчатых веществ методом спектрометрии ионной подвижности // Журнал аналитической химии. 2011. Т. 66. № 8. С. 788–809.
13. Buryakov I.A. Detection of explosives by ion mobility spectrometry // Journal of analytical chemistry 2011, T. 66. № 8. P. 788–809. ISSN 0044-4502 (in Russian).
14. Oxley J.C., Smith J.L., Brady J. Determination of the vapor density of triacetone triperoxide (TATP) // Propellants, Explosive, Pyrotechnics. 2005. V. 34. № 6. P. 539. <https://doi.org/10.1002/prep.200400094>
15. Clowers B.H., Siems W.F., Hill H.H., Mussik S.M. Hadamard transform ion mobility spectrometry // Analyt. Chem. 2006. V. 78. № 1. P. 44–51. <https://doi.org/10.1021/AC051743B>
16. Kaur-Atwal G., O'Connor G., Aksenov A.A., Bosoc-Bintintan V. Chemical standarts for ion mobility spectrometry: a review // Intern. J. Ion Mobility Spectrometry. 2009. V. 12. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/S12127-009-0021-1>
17. Murphy C. Existing and potential explosives detection techniques. Washington: The National Academies, 2004. <https://doi.org/10.17226/10998>
18. Gresham G.L., Davies J.P., Goodrich L.D. et al. Development of particle standards for testing detection systems: mass of RDX and particle size distribution of composition 4 residues // Society of Photo-Optical Inst. Engineers. 1994. V. 2276 P. 34. <https://doi.org/10.1117/12/189198>
19. Patel C.K.N. Laser photoacoustic spectroscopy helps fight terrorism: High sensitivity detection of chemical Warfare Agent and explosives // Eur. Phys. J. Special. Topics. 2008. V. 153. P. 1–18. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00383-x>
20. Демтредер В. Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента. М.: Наука, 1985. 608 с.
21. Demtredere V. Laser spectroscopy. Basic principles and techniques of experiment. Moscow: Nauka, 2005. 608 p. (in Russian).
22. Gaft M., Nagli L. UV gated Raman spectroscopy for detection of explosives // Opt. Materials. 2008. V. 30. № 11. P. 1739. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2007.11.013>
23. Nagli L., Gaft M., Flegler J., Rosenbluh M. Absolute Raman cross-sections of some explosives: Trend to UF // Optical Materials. 2008. V. 30. № 11. P. 1747. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2007.11.019>
24. Nagli L., Gaft M. Raman scattering spectroscopy for explosives identification // Proc. SPIE 6552. Laser Source Technology for Defense and Security III, 65520Z (15 May 2007); <https://doi.org/10.1117/12.719319>
25. Иноземцев В.А., Жохов А.К., Бойко А.Ю. и др. Мобильный комплекс химического контроля как основа технического оснащения мобильной диагностической группы 33 ЦНИИИ Министерства обороны Российской Федерации // Вестник войск РХБ защиты. 2021. Т. 5. № 1 С. 54–64. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-54-64>
26. Inozemtsev V.A., Zhokhov A.K., Boyko A.Yu. et al. The Mobile Complex of Chemical Control as the Basis of Technical Equipment of the Mobile Diagnostic Group of the 33 Central Scientific Research Test Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation // Journal of NBC Protection Corps. 2021. V. 5. № 1. P. 54–64. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-54-64> (in Russian).

20. Брагинец А.А., Жохов А.К., Полякова Г.Ю., Серебренников Б.В. Расширение возможностей мобильных химических лабораторий войск радиационной, химической, биологической защиты // Вестник академии военных наук. 2016. Т. 57. № 4. С. 136–141.

Braginets A.A., Zhokhov A.K., Polyakova G.Yu., Serebrennikov B.V. Expanding the capabilities of mobile chemical laboratories of the radiological, chemical and biological protection forces // Journal of the Academy of Military Sciences. 2016. V. 57. № 4. P. 136–141 (in Russian).

21. Шабельников М.П., Михайлов В.Г., Терновой А.В. и др. Деятельность мобильной диагностической группы 27 НЦ МО РФ // Вестник войск РХБ защиты. 2018. Т. 2. № 3. С. 55–63. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2018-2-3-55-63>

Shabelnikov M.P., Mikhaylov V.G., Ternovoy A.V. et al. Activities of the Mobile diagnostic group of the «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the

Russian Federation // Journal of NBC Protection Corps. 2018. V. 2. № 3. P. 55–63. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2018-2-3-55-63> (in Russian).

22. Кужелко С.В., Ковтун В.А., Колесников Д.П. Экспедиция специалистов войск РХБ защиты на остров Матуа Курильской гряды // Вестник войск РХБ защиты. 2018. Т. 2. № 1. С. 12–23. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2018-2-1-12-23>

Kuzhelko S.V., Kovtun V.A., Kolesnikov D.P. The NBC Defence troops specialists' expedition to Matua Island in the Kuril Chain // Journal of NBC Protection Corps. 2018. V. 2. № 1. P. 12–23. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2018-2-1-12-23> (in Russian).

23. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрометри. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 2014. 456 с. ISBN 978-5-02-039-051-5

Morozov A.N., Svetlichny S.I. Fundamentals of Fourier Spectroradiometry. 2nd ed., Rev. and add. Moscow: Nauka, 2014. 456 p. ISBN 978-5-02-039-051-5 (in Russian).

Об авторах

Федеральное государственное бюджетное учреждение «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Министерства обороны Российской Федерации, российская Федерация, 412918, Саратовская область, г. Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1.

Иноземцев Валерий Александрович. Начальник института, д-р воен. наук.

Ефимов Игорь Николаевич. Начальник отдела, канд. техн. наук.

Позвонков Андрей Александрович. Заместитель начальника отдела, канд. техн. наук.

Пономарев Владимир Николаевич. Старший научный сотрудник.

Самородов Александр Сергеевич. Старший научный сотрудник.

Колбинец Сергей Сергеевич. Научный сотрудник.

Контактная информация для всех авторов: 33cnii-ito@mil.ru

Контактное лицо: Иноземцев Валерий Александрович, 33cnii-ito@mil.ru

Application of Modern Technical Means of Chemical Reconnaissance and Control for the Detection and Identification of Explosives

V.A. Inozemcev, I.N. Efimov, A.A. Pozvonkov, A.S. Samorodov,

V.N. Ponomarev, S.S. Kolbinev

Federal State Budgetary Establishment «33 Central Scientific Research Test Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Krasnoznamennaya Street 1, Volsk-18, Saratov Region, 412928, Russian Federation

Received September 27, 2022. Revised 25 November, 2022. Accepted December 23, 2022

The analysis of the capabilities of modern technical means of chemical reconnaissance and special equipment of chemical control indicates the possibility of quick detection of mined and explosive devices (EDs) by identification of the explosives included in the EDs and related technological impurities. The *purpose of this work* is to analyze the possibilities of using modern technical means of chemical reconnaissance and control for the detection and identification of explosives. In order to achieve this goal, the authors assessed the analytical characteristics and features of the technical

means of chemical reconnaissance and the indication methods implemented in them to determine the possibility of detecting and identifying the components of the EDs. The article shows the possibility of using special military gas detectors operating on the basis of the ion mobility spectrometry (IMS) method to confirm the presence of the vapor phase of explosives. The assessment was carried out on the basis of an analysis of the physicochemical properties of peroxides and nitrogen-containing explosives and a comparison of the achievable concentrations of the vapor phase of nitrogen-containing explosives (TNT, RDX, pentrite, nitroglycerin, dinitrotoluene) with the results of the calculated sensitivity of the IMS method (~10–10 mg/L). It has been established that trace amounts of explosives in liquid and solid states of aggregation can be identified by portable technical means of chemical control, operating on the basis of infrared Fourier spectroscopy and Raman scattering. The ways of expanding the functionality of these technical means by creating specialized databases of spectral data of explosives and accompanying technological impurities are proposed. The inclusion of an additional spectrum bank in the control software of IMS gas detectors must be combined with the implementation of the possibility of program selection of operating modes and database switching by the operator.

Keywords: *chemical monitoring; explosive substance; gas detector; indication object; ion mobility spectrometry; raman scattering; technical devices of chemical reconnaissance.*

For citation: *Inozemcev V.A., Efimov I.N., Pozvonkov A.A., Samorodov A.S., Ponomarev V.N., Kolbinev S.S. Application of Modern Technical Means of Chemical Reconnaissance and Control for the Detection and Identification of Explosives // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6. № 4. P. 355–364. EDN: DVOLJH. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-355-364>*

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. Federal State Budgetary Establishment «33 Central Scientific Research Test Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation.

References

See P. 362–363.

Authors

Federal State Budgetary Establishment «33 Central Scientific Research Test Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Krasnoznamennaya Street 1, Volsk-18, Saratov Region, 412928, Russian Federation.

Valery Alexandrovich Inozemcev. Head of Institute, Doctor of Military Sciences

Igor' Nikolaevich Efimov. Associate Professor, Head of Department, Candidate of Technical Sciences.

Andrey Aleksandrovich Pozvonkov. Deputy Head of Department, Candidate of Technical Sciences.

Aleksandr Sergeevich Samorodov. Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Vladimir Nikolaevich Ponomarev. Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Sergey Sergeevich Kolbinev. Researcher.

Contact information for all authors: 33cnii-ito@mil.ru

Contact person: Valery Alexandrovich Inozemcev; 33cnii-ito@mil.ru



Опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции при ликвидации чрезвычайных ситуаций

А.С. Морозов, В.П. Лакомов, А.А. Носков

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения
«48 Центральный научно-исследовательский институт»
Министерства обороны Российской Федерации (г. Екатеринбург),
620085, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Звездная, д. 1

Поступила 07.09.2022 г. Исправленный вариант 10.11.2022 г. Принята к публикации 23.12.2022 г. При проведении войсками РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций биологического характера (ЧСБХ) широко используются модульные и носимые технические средства дезинфекции, основанные на аэрозольном способе обработки объектов. Цель работы – обобщить опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции при ликвидации чрезвычайной ситуации биологического характера. Наиболее интенсивное применение мобильных технических средств дезинфекции осуществлялось на протяжении более двух лет на аэродроме «Чкаловский» сводным отрядом РХБ защиты, который выполнял работы по обеззараживанию воздушных судов Военно-космических Сил России и перевозимых ими грузов от возбудителя коронавирусной инфекции. Основной объем работ по дезинфекции грузовых отсеков и кабин пилотов летательных аппаратов, перевозимых грузов выполнялся аэрозольным способом с использованием технических средств: комплекта для аэрозольной дезинфекции транспорта, зданий, сооружений и средств индивидуальной защиты (комплект КДА), ранцевых моторизованных и ручных опрыскивателей. Аэрозольный способ обработки и рецептура на основе этилового спирта обеспечивали высокую производительность работ, небольшие затраты ручного труда и надежное обеззараживание объектов при небольших расходах препарата. Так, время обработки грузового отсека самолетов АН-124 с помощью автономных модулей комплекта КДА или ранцевых опрыскивателей STIHL SR 450 не превышала 20 мин, а расход рецептуры составлял не более 100 см³/м². Применение в подразделениях РХБ защиты современных модульных и носимых средств обеззараживания обеспечит повышение эффективности проведения дезинфекционных мероприятий в интересах войск и населения Российской Федерации.

Ключевые слова: аэрозольная дезинфекция; войска радиационной, химической и биологической защиты; военно-транспортная авиация; коронавирусная инфекция; пандемия; специальная обработка; техническое средство; чрезвычайная ситуация биологического характера.

Библиографическое описание: Морозов А.С., Лакомов В.П., Носков А.А. Опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции при ликвидации чрезвычайных ситуаций // Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т. 6. № 4. С. 365–371. EDN: GDTHDR. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-365-371>

Опыт проведения дезинфекционных мероприятий последних лет, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций биологического характера (ЧСБХ), свидетельствует о широких возможностях войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации решать задачи по специальной обработке (СО) различных объектов военного и гражданского назначения.

Это подтверждается успешными действиями группировки войск в эпидемических очагах сибирской язвы на полуострове Ямал (2016 г.) [1], в городе Тулун после наводнения в Иркутской области (2018 г.), а также результатами работ по противодействию распространению пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19. Положительные результаты работ были достигнуты, в том числе благодаря

Опыт проведения дезинфекционных мероприятий последних лет, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций биологического характера (ЧСБХ), свидетельствует о широких возможностях войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации решать задачи по специальной обработке (СО) различных объектов военного и гражданского назначения.

Это подтверждается успешными действиями группировки войск в эпидемических очагах сибирской язвы на полуострове Ямал (2016 г.) [1], в городе Тулун после наводнения в Иркутской области (2018 г.), а также результатами работ по противодействию распространению пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19. Положительные результаты работ были достигнуты, в том числе благодаря использованию новых мобильных технических средств дезинфекции.

Цель работы – обобщить опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции при ликвидации чрезвычайной ситуации биологического характера.

Существующий состав сил и средств подразделений СО определялся в основном особенностями выполнения задач боевого обеспечения войск, действующих в районах заражения. Предполагалось, что такие районы будут иметь искусственное происхождение в результате применения противником биологического оружия. Преимущественными объектами обеззараживания считались военнослужащие и мобильные образцы вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), а также военное имущество. Большое внимание уделялось обеззараживанию наружных поверхностей объектов, участков дорог и местности.

Наиболее важными критериями, определяющими эффективность проведения СО, являются полнота обеззараживания и оперативность выполнения работ.

Для СО объектов войска РХБ защиты оснащены высокопроизводительными тепловыми машинами ТМС для поточной обработки ВВСТ, авторазливочными станциями АРС для обеззараживания техники, дорог и местности или различными комплектами автономных приборов, выдаваемых экипажам зараженных машин для рассредоточенной обработки [2, 3]. Указанные технические средства укомплекто-

ваны препаратами и рецептурами широкого спектра антимикробного действия.

Для санитарной обработки военнослужащих в полевых условиях имеются дезинфекционно-душевые комплексы ДДК.

В последние годы на снабжение войск были поставлены новые современные средства: универсальная станция специальной обработки УССО¹, комплект для дезинфекции объектов аэрозольным методом КДА², универсальная тепловая машина УТМ-80М³ и другие образцы.

Дезинфекционные мероприятия, проводимые при ликвидации ЧСБХ, в сравнении со специальной обработкой войск, хотя и имеют общую цель и методологию обеззараживания, однако у них существуют и отличия. Например, возникновение очагов коронавирусной инфекции COVID-19 происходило в среде, непосредственно окружающей человека, а ее быстрое распространение обеспечивалось естественным путем заболевшими людьми и через современные коммуникации. В этой связи преимущественными объектами микробной контаминации, а, следовательно, и дезинфекции, являлись люди, их одежда и личные вещи, жилые и служебные помещения, бытовые приборы и оборудование, пассажирский транспорт, объекты массового нахождения людей: больницы, торговые и развлекательные комплексы, транспортная инфраструктура, включая метрополитен, вокзалы и аэропорты [4, 5]. При этом требовалось использовать все виды дезинфекционной обработки: профилактическую, очаговую и заключительную [6]. В общественных местах были организованы работы по обеззараживанию воздуха, контактных поверхностей, проводилась так называемая «барьерная» дезинфекция, в том числе в присутствии людей. Преимущественно были востребованы вирулицидные средства «щадящего» действия [7].

Основной объем дезинфекционных работ выполнялся в помещениях, размещенных на различных этажах зданий или в подземных сооружениях, а обработка наружных поверхностей домов, техники, участков дорог и местности, как правило, не требовалась.

Проводимые в период пандемии дезинфекционные мероприятия характеризовались большим объемом, длительностью и многоэтапностью проводимых работ [8].

¹ Приказ Министра обороны Российской Федерации от 22 марта 2014 г. «О принятии на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации универсальной станции специальной обработки».

² Приказ Министра обороны Российской Федерации от 29 мая 2015 г. «О принятии на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации комплекта для аэрозольной дезинфекции транспорта, зданий, сооружений и средств индивидуальной защиты КДА».

³ Приказ Министра обороны Российской Федерации от 22 марта 2014 г. «О принятии на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации универсальной тепловой машины УТМ-80М».

В сложные эпидемические районы и на критически важные объекты были направлены мобильные подразделения войск РХБ защиты. В марте 2020 г. был сформирован сводный отряд войск РХБ защиты, основной задачей которого являлась дезинфекция самолетов и вертолетов военно-транспортной авиации (ВТА), прибывающих на аэродром «Чкаловский».

Отряд был оснащен современными индивидуальными средствами защиты и укомплектован специальной техникой: авторазливочные станции APC-14KM (5 ед.), тепловые машины ТМС-65У (2 ед.) и УТМ-80У (1 ед.), универсальная станция специальной обработки УССО (1 ед.) и комплект КДА (2 ед.).

Для выполнения работ на летном поле был развернут пункт СО, который включал в себя две основные площадки:

- дезинфекции самолетов и грузов;
- санитарной обработки экипажей и пассажиров самолетов, а также личного состава сводного отряда.

Кроме того, на контрольно-пропускном пункте аэродрома силами расчета APC-14KM был создан барьерный пункт обработки техники.

При организации работ учитывали, что используемые средства дезинфекции должны обеспечивать высокую эффективность в отношении вируса SARS-CoV-2 и удовлетворять требованиям безопасности: не оказывать токсическое действие на людей и не вызывать повреждения оборудования.

В соответствии с этим, при обработке авиационной техники и грузов руководствовались рекомендациями Роспотребнадзора⁴ и указаниями начальника войск РХБ защиты.

На начальном этапе для обеззараживания объектов от коронавируса Роспотребнадзором России было рекомендовано использовать рецептуры на основе хлорсодержащих, перекисных препаратов, четвертичных аммониевых соединений, гуанидинов или спиртов. Их высокая вирулицидная активность подтверждается отечественными и зарубежными авторами [9, 10].

Учитывая конструктивную сложность летательных аппаратов, их насыщенность различным оборудованием, необходимость «щадящей» обработки, а также совместимость с применяемыми в авиационной технике материалами, обеззараживание внутренних поверхностей объектов ВТА, грузов и личного состава проводили водным 75 % раствором этилового спирта.

Для дезинфекции воздуха и поверхностей летательных аппаратов и грузов применяли аэ-

розольный способ обработки, который обеспечивал высокую производительность работ, минимальные затраты ручного труда и надежное обеззараживание объектов при небольших расходах рецептуры [11]. Норма расхода рецептуры составляла: при орошении поверхностей – не более 100 см³/м², при объемной аэрозольной обработке – до 100 см³/м³.

При выполнении работ особое внимание уделяли соблюдению мер противопожарной безопасности и равномерной обработке поверхностей, не приводящей к скоплению жидкости на поверхности оборудования.

Дезинфекционные работы выполняли последовательно в три этапа.

Сначала на выходе из самолета проводили аэрозольную обработку одежды (на людях) и личных вещей прибывшего экипажа и пассажиров. При наличии признаков заболевания людей направляли на пункт санитарной обработки и далее в медицинские учреждения.

После этого заполняли внутренний объем грузового отсека самолета аэрозолями раствора, герметизировали и экспонировали в течение 30–60 мин. По окончании экспозиции производили выгрузку и дополнительную дезинфекционную обработку доставленного груза.

На заключительном этапе проводили обеззараживание грузового отсека и кабины пилотов самолета направленным аэрозолями дезинфицирующего средства.

Находящиеся в составе сводного отряда тепловые машины ТМС-65У, авторазливочные станции APC-14KM оказались мало приспособленными для аэрозольной обработки внутренних поверхностей авиационной техники, грузов и личного состава. С учетом особенностей конструкции летательных аппаратов было принято решение проводить их обработку с использованием модулей переносных дезинфекционных (МПД) из состава комплекта КДА.

Комплект КДА был создан ОАО НПП «Адвент» (г. Санкт-Петербург) на основе технических разработок специалистов филиала ФГБУ «48 ЦНИИ» Минобороны России (г. Екатеринбург).

В его состав входит шесть автономных модулей МПД, позволяющих проводить обработку транспорта, зданий, местности и других объектов мощным аэрозольным потоком дезинфектанта.

Комплект КДА характеризуется высокой производительностью, мобильностью, хорошей приспособленностью для обработки объектов массового скопления людей, автономной работы на удаленных объектах, а также для работы в

⁴ Инструкция по проведению дезинфекционных мероприятий для профилактики заболеваний, вызываемых коронавирусами. Приложение к письму Роспотребнадзора от 23.01.2020 № 02/770-2020-32.

зимних условиях. Производительность образца по дезинфекции автотранспорта составляет не менее 24 ед./ч, поверхностей – не менее 5240 м²/ч.

Комплект показал высокую эффективность при ликвидации очага сибирской язвы на полуострове Ямал, при обеззараживании объектов от коронавирусной инфекции на территории России, Сербии и Италии.

Опыт эксплуатации комплекта КДА в течение двух лет свидетельствует о его высокой эффективности, надежности, экономичности и подтвердил правильность положенного в его основу модульного принципа построения специальной техники, обеспечивающего высокую гибкость при решении задач по дезинфекции объектов.

Для примера можно сказать, что при выполнении задач на аэродроме «Чкаловский» время работы модулей МПД составляло от 15 до 20 ч в сутки.

Исправное функционирование технического средства было обеспечено его высокой надежностью, ремонтпригодностью, своевременным техническим обслуживанием.

Как правило, обработку крупногабаритной техники (самолет типа АН-124) проводил расчет из пяти человек с использованием двух электрических или механических модулей МПД из состава комплекта КДА. Кроме того, два человека были задействованы на обработке кабины пилотов и кабины резервного экипажа. Учитывая высокую интенсивность выполняемых работ, смена расчета на модулях МПД проводилась каждый час.

Сводный отряд обеспечивал одновременную обработку до двух самолетов типа АН-124 и грузов или до четырех самолетов типа ИЛ-76 и грузов.

Результаты анализа начального этапа выполненных работ позволили сделать заключение о том, что для повышения их эффективности необходимо дополнительно оснастить сводный отряд мобильными средствами дезинфекции.

Анализ имеющихся сведений о проведении дезинфекционных работ показал, что в России и за рубежом все более широкое применение находят носимые опрыскиватели ранцевого типа с приводом от двигателя внутреннего сгорания, электроприводом или ручным приводом [8]. Они имеют высокую производительность, эксплуатируются одним оператором, приспособлены для выполнения автономной работы как в помещениях, так и

на транспорте^{5,6}. Конструкция таких установок позволяет:

- получать высокоскоростной поток рецептуры для аэрозольной дезинфекции объектов, а также для обработки объекта на большом удалении;

- регулировать характеристики аэрозольного потока дезинфектанта, получать высокодисперсный аэрозоль для объемной обработки закрытых объектов, низкодисперсный – для направленного орошения поверхностей.

Представленные на рынке ранцевые бензиновые опрыскиватели имеют мощность двигателя от 2,9 до 5,0 л.с., запас топлива варьирует от 1,4 до 1,7 л. Распылители установок образуют аэрозольный факел длиной от 11 до 15 м. Имеется возможность регулирования расхода дезинфектанта в диапазоне от 0,14 до 4,6 л/мин. Снаряженная масса образцов составляет около 25 кг. Учитывая предыдущий опыт эксплуатации опрыскивателей данного класса, технические и эргономические характеристики, для проведения дезинфекции самолетов был выбран опрыскиватель STIHL SR 450.

В результате его эксплуатации были подтверждены заявленные производителем технические характеристики образца, высокая надежность, простота обслуживания и ремонта.

Опрыскиватель STIHL SR 450 позволял проводить дезинфекционную обработку оборудования в грузовом отсеке самолета АН-124 на высотах до 4,5 м. Затраты времени на заполнение аэрозодем дезинфектанта грузовых отсеков самолетов ВТА с его использованием составляли от 10 до 20 мин (в зависимости от загруженности). Производительность образца при максимальной нагрузке достигала 30 м²/мин, время на обработку грузового отсека ИЛ-76 не превышала 15 мин.

Несмотря на достоинства бензиновых опрыскивателей, при их практической эксплуатации были выявлены отдельные недостатки. К ним можно отнести большой шум, наличие выхлопных газов двигателя, а также необходимость частой перезарядки рецептурой.

Для выполнения задач с небольшим объемом работ, например, при обработке самолетов типа АН-24, АН-142, вертолетов МИ-8, МИ-17, кабин пилотов использовали ручные опрыскиватели облегченного типа. Такие изделия характеризуются небольшой производительностью и удобны в эксплуатации.

Ранцевые опрыскиватели, как правило, изготовлены из пластика или его комбинации

⁵ Обзор распылителей. Распылители для дезинфекции. URL: <https://myuborka24.ru/stati/obzor-raspiliteley> (дата обращения: 31.10.2022).

⁶ Ранцевый опрыскиватель: характеристики бензиновой, электрической, моторной и помповой разновидности. Рейтинг моделей. URL: <https://stroy-podskazka.ru/hod-za-uchastkom/rancevye-oprskivateli-raspiliteley> (дата обращения: 31.10.2022).

с металлическими элементами. Они позволяют проводить дезинфекцию объектов высотой не более 3 м. Объем резервуара составляет от 11 до 20 л. Избыточное давление в нем создается встроенной помпой. Расход рецептуры – регулируемый и составляет от 0,3 до 1,4 л/мин. В работах на аэродроме «Чкаловский» были использованы гидравлические опрыскиватели «Жук» – компактные облегченные образцы.

Применение гидравлических ранцевых опрыскивателей показало их высокую мобильность и надежность, однако их использование сопряжено со значительными затратами физического труда оператора.

В этом плане можно рекомендовать замену ручных опрыскивателей на аккумуляторные распылители, которые также имеют высокую автономность и при их использовании существенно снижаются затраты ручного труда. В случае выхода из строя насоса или аккумулятора система подачи раствора может быть дублирована ручной помпой.

Обобщая приведенные материалы, следует отметить, что в рамках противодействия пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 подразделениями войск РХБ защиты были успешно выполнены задачи по проведению дезинфекционных мероприятий в частях ВТА.

Проведенные практические работы показали высокую эффективность применения мо-

бильных технических средств, реализующих аэрозольные способы дезинфекции подобных объектов.

Вместе с тем специалисты, привлекаемые к ликвидации ЧСБХ, отметили необходимость совершенствования способов обеззараживания таких высокотехнологичных объектов, как летательные аппараты, и модернизации технических средств специальной обработки войск РХБ защиты, с учетом решения подобных задач.

Выводы

1. Практический опыт выполнения подразделенийми войск РХБ защиты задач по противодействию распространению новой коронавирусной инфекции показал необходимость их оснащения адаптированными к условиям войсковой эксплуатации высокопроизводительными носимыми установками с мото- и электроприводом, снаряженной массой не более 25 кг, реализующими аэрозольные способы дезинфекции объектов.

2. В качестве перспективных образцов специалисты рассматривают бензиновые и аккумуляторные опрыскиватели для аэрозольной обработки с производительностью по раствору 2–3 л/мин, длиной аэрозольного потока не менее 5 м и возможностью регулирования расхода и фракционно-дисперсного состава аэрозольного факела в зависимости от решаемой задачи.

Вклад авторов / Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Финансирование. Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (г. Екатеринбург).

Список источников / References

1. Поклонский Д.Л., Матвеев А.В., Чифанов Д.Е. и др. Методические аспекты утилизации павших животных при ликвидации очагов эпизоотий // Вестник войск РХБ защиты. 2017. № 4. С. 50–58. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-4-50-58>

Poklonsky D.L., Matveev A.V., Chifanov D.E. et al. Methodological aspects of utilization of the perished

animals at elimination of the centers of epizooty// Journal of NBC Protection Corps. 2017. № 4. P. 50–59. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-4-50-58> (in Russian).

2. Карпов В.П., Казимиров О.В., Капканец К.С. Научно-технический анализ основных направлений исследований при создании новых образцов

технических средств и рецептов специальной обработки // Вестник войск РХБ защиты. 2017. № 1. С. 42–52. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-1-42-52>

Karpov V.P., Kazimirov O.V., Kapkanets K.S. Scientific and technical analysis of the main directions of research in creating new samples of technical means and recipes special treatment // Journal of NBC Protection Corps. 2017. V. 1. № 1. P. 42–52. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2017-1-1-42-52> (in Russian).

3. Войска радиационной, химической и биологической защиты. 100 лет. Военно-исторический очерк, посвященный столетию со дня образования Войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации. М.: ООО «Синтерия», 2018. 712 с.

NBC Protection Corps. 100 years. Military-historical essay dedicated to the century of the formation of the NBC Protection corps of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow: Sinteria LLC, 2018. 712 p. (in Russian).

4. Кудрявцева Е.Е., Манькович Л.С., Остапенко Е.В. Опыт организации дезинфекционных мероприятий в условиях пандемии коронавирусной инфекции 2020 г. // Дезинфекционное дело. 2020. № 4. С. 32–39.

Kudryavseva E.E., Man'kovich L.S., Ostapenko E.V. Experience of organization of disinfection affairs in condition of coronavirus infection of 2020 // Desinfection Affairs. 2020. № 4. P. 32–39 (in Russian).

5. Путырская Т.В., Глобин Н.Г. Эффективность дезинфекционной деятельности в эпоху COVID-19 и после COVID-19 // Дезинфекционное дело. 2020. № 4. С. 62–64.

Putyrskaya T.V., Globin N.G. Efficiency of disinfection activity during the period of COVID-19 and after COVID-19 // Desinfection Affairs. 2020. № 4. P. 62–64 (in Russian).

6. Вилькович В.А. Дезинфекционное дело. М.: Медицина, 1987. 431 с.

Vil'kovich V.A. Desinfection Affairs. Moscow: Medicine, 1987. 431 p. (in Russian).

7. Береженко Л.В. Дезинфекция в общественных местах и транспорте как способ предотвращения распространения COVID-19 // Дезинфекционное дело. 2020. № 4. С. 40–44.

Berezhko L.V. Disinfection in public places and transport as a method of prevention of distribution COVID-19 // Desinfection Affairs. 2020. № 4. P. 40–44 (in Russian).

8. Какучая И.Г., Шишкин Ю.М., Ватолина Н.А. Опыт организации работы по заключительной дезинфекции в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 // Дезинфекционное дело. 2021. № 2. С. 62–64.

Kakuchaya I.G., Shishkin Yu.M., Vatolina N.A. Experience in organizing work on the final disinfection in the pandemic of a new coronavirus infection COVID-19 // Desinfection Affairs. 2021. № 2. P. 62–64 (in Russian).

9. Буянов В.В., Никольская В.П., Канищев В.В. и др. Средства дезинфекции при ликвидации последствий биологического заражения при различных температурах. Черногловка: Институт проблем химической физики РАН, 2003. 276 с.

Buyanov V.V. Nikol'skaya, V.P. Kanishchev V.V. et al. Means of disinfection in the elimination of the consequences of biological contamination at various temperatures. Chernogolovka: Institute of Chemical Physics problems of the Russian Academy of Science, 2003. 276 p. (in Russian).

10. Райнбабен Фридрих фон. Основы противовирусной дезинфекции. Пер. с нем. М.: ООО Самарово. Изд-во «Летний сад», 2014. 526 с.

Reinbaben Friedrich. Fundamentals of antiviral disinfection. Transl. from German. Moscow: Samarovo LLC. Publ. "Summer Garden", 2014. P.526 (in Russian).

11. Цетлин В.М., Вилькович В.А. Физико-химические факторы дезинфекции. М.: Медицина, 1969. 287 с.

Tsetlin V.M., Vil'kovich V.A. Physical and chemical factors of disinfection. Moscow: Medicine, 1969. 287 p. (in Russian).

Об авторах

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (г. Екатеринбург), 620085, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Звездная, д. 1.

Морозов Александр Сергеевич. Начальник управления, старший научный сотрудник, канд. тех. наук.

Лакомов Владимир Павлович. Ведущий научный сотрудник, канд. тех. наук, старший научный сотрудник.

Носков Андрей Анатольевич. Начальник управления, канд. тех. наук.

Контактная информация для всех авторов: 47051_1@mil.ru

Контактное лицо: 47051_1@mil.ru

Use of Modular and Wearable Technical Means of Disinfection During Liquidation of Emergency Situations

A.S. Morozov, V.P. Lakomov, A.A. Noskov

Branch Office of the Federal State Budgetary Establishment «48 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Zvezdnaya Street 1, Yekaterinburg 620085, Russian Federation

Received September 7, 2021. Revised November 10, 2022. Accepted December 23, 2022

In the process of liquidation of emergency situations of biological nature (ESBN) by the NBC Protection Corps of the Armed Forces of the Russian Federation, the modern modular and wearable technical means of disinfection based on an aerosol method of treatment of objects were widely used. *The purpose of the work* is to summarize experience of the use of modular and wearable technical means of disinfection during the liquidation of biological emergency. The most intensive use of mobile technical means of disinfection was carried out for more than two years in Chkalovsky airfield by the combined NBC protection group, which carried out work on the disinfection of aircraft of the Military Space Forces and the cargo transported by them against the pathogen of coronavirus infection. The main volume of work on disinfection of cargo compartments and cockpits of pilots of aircraft as well as cargo was performed in the aerosol method with the use of the following technical means: CDA (Aerosol Disinfection Complex) complex, the backpack motorized and manual sprayers. The aerosol treatment method and the formulation based on ethyl alcohol provided high productivity of works, low manual labor costs, and reliable disinfection of objects with low consumption of preparation. Thus, the processing time of the cargo compartment of AN-124 aircraft with the help of autonomous modules of the CDA or backpack sprayers STIHL SR 450 did not exceed 20 minutes, and the consumption of the recipe was not more than $100 \text{ cm}^3 \times \text{m}^{-2}$. The use of modern modular and wearable disinfection means in the NBC protection units will ensure the increase of efficiency of disinfection measures in the interests of troops and population of the Russian Federation.

Keywords: *aerosol disinfection; NBC Protection Corps; military transport aviation; coronavirus infection; special treatment; technical means; pandemic; biological emergency.*

For citation: *Morozov A.S., Lakomov V.P., Noskov A.A. Use of Modular and Wearable Technical Means of Disinfection During Liquidation of Emergency Situations // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6. № 4. P. 365–371. EDN: GDTHDR. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-365-371>*

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. Branch Office of the Federal State Budgetary Establishment «48 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation (Yekaterinburg).

References

See P. 369–370.

Authors

Branch Office of the Federal State Budgetary Establishment «48 Central Scientific Research Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation (Yekaterinburg), Zvezdnaya Str. 1, Yekaterinburg 620085, Russian Federation.

Alexander Sergeevich Morozov. Senior of Researcher, Candidate of Technical Sciences

Vladimir Pavlovich Lakomov. Senior of Researcher, Candidate of Technical Sciences

Andrei Anatolievich Noskov. Chief of Department, Candidate of Technical Sciences

Contact information for all authors: 47051_1@mil.ru

Contact person: Alexander Sergeevich Morozov: 47051_1@mil.ru

Анализ состояния развития и применения беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач РХБ безопасности

© АВТОРЫ, 2022
УДК 629.7:358.39:54
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-372-385>
<https://elibrary.ru/havvlu>



К.Н. Аккузин, Е.С. Макеев

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко»
Министерства обороны Российской Федерации, 156015, Российская Федерация,
г. Кострома, ул. Горького, д. 16

Поступила 30.06.2022 г. Принята к публикации 23.12.2022 г.

Лекция предназначена для подготовки специалистов в высших военных учебных заведениях по Федеральному государственному стандарту «Робототехника военного и специального назначения», а также для профессионально-должностной подготовки офицеров и операторов робототехнических комплексов с беспилотными летательными аппаратами в учебных центрах и воинских частях.

В лекции рассмотрены три учебных вопроса:

- 1) Анализ источников радиационных, химических и биологических угроз в Российской Федерации.
- 2) Анализ состояния развития и применения зарубежных беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач радиационной, химической и биологической безопасности.
- 3) Анализ состояния развития и применения отечественных беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач радиационной, химической и биологической безопасности.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; РХБ безопасность; система вооружения и средств РХБ защиты.

Библиографическое описание: Аккузин К.Н., Макеев Е.С. Анализ состояния развития и применения беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач РХБ безопасности // Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т. 6, № 4. С. 372–385. EDN: HAVVLU.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-372-385>

В лекции рассматриваются источники потенциальных РХБ угроз, а также проводится анализ тенденций развития и применения отечественных и зарубежных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для решения задач РХБ безопасности.

Материал, представленный в лекции, направлен на расширение знаний обучающихся в области РХБ угроз, а также развития и применения БЛА в целях обеспечения РХБ безопасности войск и населения. Рассмотрены характер и виды актуальных на сегодняшний день угроз РХБ направленности. Проанализировано современное состояние вопроса разработки и подходы к применению БЛА как отечественного, так и зарубежного про-

изводства, в целях предотвращения и ликвидации РХБ угроз.

Первые работы по созданию в СССР беспилотных летательных аппаратов начались в начале 30-х годов XX века. Первоначально нагруженные взрывчаткой радиоуправляемые БЛА рассматривались в роли «воздушных торпед». Их предполагалось использовать против важных целей, хорошо прикрытых зенитной артиллерией, где пилотируемые бомбардировщики могли понести большие потери.

Первым самолетом, на котором в СССР было испытано дистанционное радиоуправление, стал двухмоторный бомбардировщик ТБ-1 конструкции А.Н. Туполева (рисунок 1),

испытания которого начались в октябре 1933 года¹.

На протяжении почти столетия, параллельно с научно-техническим прогрессом, развивались и БЛА, обеспечивая при этом новые возможности их применения, одной из которых является обеспечение РХБ безопасности.

Войска РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) являются одним из ключевых формирований, обеспечивающих предотвращение и ликвидацию РХБ угроз в Российской Федерации.

Именно специалисты войск РХБ защиты ВС РФ одними из первых применили технологии робототехники при выполнении задач по предназначению, что обусловлено высокими рисками для личного состава при выполнении таких задач.

Опыт применения робототехнических комплексов (РТК), полученный в результате ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), стал мощным толчком в сфере разработок как наземных экстремальных РТК отечественного производства [1], так и БЛА, и уже в 1990 году испытательный полет совершил один принципиально новых БЛА, тогда еще Вооруженных Сил СССР – «Пчела-1Т», разработанный НИИ «Кулон» [2].

1. Анализ источников радиационных, химических и биологических угроз в Российской Федерации

Любая современная война, в любом ее проявлении, будет характеризоваться постоянной угрозой применения противником ядерного и других видов оружия массового поражения, массированным применением высокоточного оружия, катастрофическими последствиями разрушений радиационно, химически и биологически опасных объектов.

Не меньшую опасность для населения представляют и РХБ угрозы мирного времени.

Рассмотрим актуальные на сегодняшний день потенциальные источники РХБ угроз.

Угрозы радиационного характера

Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения².



Рисунок 1 – Двухмоторный бомбардировщик ТБ-1 конструкции А.Н. Туполева с дистанционным управлением (URL: <https://topwar.ru/137169-otechestvennaya-bespilotnaya-aviaciya-chast-1.html>; дата обращения: 24.05.2022)

Угрозу такой безопасности для граждан РФ в военное время представляет политика стран блока НАТО.

Так, США обновили свою ядерную доктрину и разрабатывают боеголовку малой мощности для баллистических ракет подводного базирования и крылатых ракет морского базирования, которые не нуждаются в поддержке страны размещения, чтобы оставаться действенным средством сдерживания^{3,4}.

Основными источниками угроз радиационного характера в мирное время являются аварии и несчастные ситуации на объектах, использующих радиоактивные материалы (атомные электростанции, радиохимические предприятия промышленности; предприятия по производству, ремонту и утилизации судов атомного флота; хранилища выведенных из эксплуатации атомных реакторов и отработанного ядерного топлива; полигоны захоронения ядерных отходов; объекты по производству, эксплуатации и хранению ядерного оружия, ядерных установок, изделий на основе ядерных материалов).

Высокотехнологичные объекты атомной отрасли рассредоточены по различным субъектам РФ. В 22 субъектах РФ расположены 27 градообразующих предприятий атомного комплекса, а в 18 субъектах – другие предприятия Госкорпорации «Росатом» [3].

¹ Отечественная беспилотная авиация (часть 1). URL: <https://topwar.ru/137169-otechestvennaya-bespilotnaya-aviaciya-chast-1.html> (дата обращения: 14.05.2022).

² О радиационной безопасности населения: Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ (ред. от 11 июня 2021 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/9015351/titles/64U0IK?ysclid=lbqkz8as8r684644673> (дата обращения: 02.12.2022).

³ Малой мощностью. Почему Россию тревожат новые американские ядерные боеголовки. URL: <https://news.rambler.ru/usa/43633477-maloy-moschnostyu-pochemu-rossiyu-trevozhat-novye-amerikanskie-yadernye-boegolovki/?ysclid=lbgl3j47ql705747531> (дата обращения: 02.12.2022).

⁴ США создают ядерное оружие малой мощности. URL: <https://newsland.com/post/6193622-ssha-sozdadut-iadernoe-oruzhie-maloi-moshchnosti?ysclid=lbgl2ski6u766652367> (дата обращения: 02.12.2022).

В состав ядерного энергетического комплекса входят более 90 предприятий, действующих во всех сегментах атомной энергетики и ядерного топливного цикла.

В Российской Федерации эксплуатируется 11 атомных электростанций, включающих 37 энергоблоков, в том числе плавучая АТЭС «Академик Ломоносов».

Ядерный оружейный комплекс Госкорпорации «Росатом» обеспечивает реализацию нашей страной политики ядерного сдерживания, осуществляя свою деятельность совместно с предприятиями оборонно-промышленного комплекса России, управлениями, соединениями и воинскими частями МО РФ. В состав ядерного оружейного комплекса входят федеральные ядерные центры в городах Сарове и Снежинске, ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «Комбинат «ЭХП», ФГУП «ПСЗ» и другие.

Российская Федерация обладает самым мощным атомным ледокольным флотом в мире. Управлять работой ледоколов уполномочено ФГУП «Атомфлот», базирующееся в Мурманске. В настоящее время «Атомфлот» эксплуатирует 6 атомных ледоколов («Ямал» и «50 лет Победы», «Таймыр» и «Вайгач», «Арктика», «Сибирь»), а также лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть» и спецтанкер для жидких радиоактивных отходов «Серебрянка».

В ВС РФ на сегодняшний день насчитывается более 40 атомных подводных лодок, а в научно-исследовательских организациях – свыше 46 ядерных установок.

Основными центрами, обеспечивающими исследования в области фундаментальной ядерной физики в Госкорпорации «Росатом», являются государственные научные центры Российской Федерации ИФВЭ (Московская область, г. Протвино) и ИТЭФ (г. Москва).

Хранение и переработка отработанного ядерного топлива осуществляется на двух комбинатах: ФГУП «Горно-химический комбинат» и ФГУП «ПО «Маяк», в которых имеются хранилища бассейнового типа для хранения отработанного ядерного топлива отечественных АЭС и транспортных ядерно-энергетических установок. Темпы переработки радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива отстают от темпов их образования. Последнее, наряду с техногенными факторами, обуславливает потенциальные риски радиационных аварий, подробно рассмотренных в [1].

Угрозы химического характера

Состояние химической безопасности определяется состоянием защищенности на-

селения и окружающей среды от негативного воздействия опасных химических факторов, при котором химический риск остается на допустимом уровне⁵.

Наличие опасных химических факторов, формирующих недопустимый риск и способных привести к возникновению массовых отравлений, ухудшению ситуации в области химической безопасности и (или) перерастанию ее в чрезвычайную ситуацию химического характера, представляет собой химическую угрозу.

Одним из недавних примеров крупнейшей химической катастрофы является взрыв аммиачной селитры в порту г. Бейрут (Ливан) 4 августа 2020 г. в результате которого погибло более 130 человек и пострадало около 5 тыс. человек.

В Российской Федерации функционирует не менее 2800 предприятий промышленности и жизнеобеспечения, представляющих собой аварийно-опасные химические объекты.

Предприятия подобного рода дислоцируются во всех федеральных округах и в 71-м субъекте РФ. Наибольшее развитие химическая отрасль получила в четырех федеральных округах: Приволжском (доля округа в общем объеме производства химического комплекса РФ составляет 43,5%), Центральном (24,4%), Сибирском (11,2%) и Южном (10,4%).

К числу городов, высоконагруженных производствами и объектами химического профиля, относятся: г. Дзержинск (Нижегородская область), г. Новочебоксарск (Чувашская Республика), г. Кирово-Чепецк (Кировская область), г. Березники (Пермский край), г. Волгоград, г. Нижнекамск (Республика Татарстан), г. Стерлитамак (Республика Башкортостан), г. Невинномыск (Ставропольский край), г. Волжский (Волгоградская область), г. Чапаевск (Самарская область), г. Кемерово, г. Череповец (Вологодская область).

Угрозу населению РФ создавали запасы химического оружия, дислоцировавшиеся на 7 объектах хранения в Курганской, Брянской, Кировской, Пензенской, Саратовской областях и Удмуртской Республике. Однако уже в 2017 г. все запасы химического оружия в РФ были уничтожены по федеральной программе.

На сегодняшний день наибольшую опасность представляют собой такие аварийно химически опасные вещества, применяющиеся в промышленности, как: аммиак, ацетонитрил, водород фтористый, водород цианистый, диметиламин, метил хлористый, метилакрилат, ни-

⁵ Указ Президента Российской Федерации от 11 марта 2019 г. № 97 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области обеспечения химической и биологической безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу». URL: <https://docs.cntd.ru/document/553849979?ysclid=lbgra410g2591203635> (дата обращения: 02.12.2022).

трил акриловой кислоты, окислы азота, окись этилена, сернистый ангидрид, сероводород, сероуглерод, соляная кислота, формальдегид, фосген, хлор, хлорпикрин [3].

Угрозы биологического характера

Главные угрозы биологического характера, обуславливающие необходимость защиты населения, определяются в первую очередь потенциальной вероятностью аварий на таких биологически опасных объектах как: военно-биологические объекты по разработке средств защиты от биологического оружия; промышленные объекты по производству медико-биологических средств защиты; объекты по хранению запасов медико-биологических средств защиты; промышленные объекты, выпускающие или использующие в производственном цикле особо опасные биологические агенты и патогенные организмы; научно-исследовательские институты и учебные заведения микробиологического, вирусологического и эпидемиологического профиля; санитарно-эпидемиологические и ветеринарные учреждения, использующие биологически опасные вещества и патогенные организмы; скотомогильники и природные резервуары с возбудителями опасных и особо опасных инфекционных заболеваний человека, сельскохозяйственных животных и растений.

В Российской Федерации имеется более 120 объектов различной ведомственной принадлежности, имеющих биологически опасные агенты, при этом около 40% из них находятся в Москве и Московской области.

Основным фактором потенциальной опасности производств на этих объектах является биологический контакт с микроорганизмами I-II групп патогенности и продуктами микробиологического синтеза. Возможности современного биотехнологического оборудования позволяют получать тысячи литров высококонцентрированного микробосодержащего материала, что создает угрозу распространения возбудителей инфекционных заболеваний за пределы рабочей и санитарной зон.

Еще больший масштаб заражения могут вызвать технологические и аварийные выбросы, сопровождающиеся диспергированием возбудителей во внешнюю среду и созданием высоких уровней биологического заражения, сопоставимых с применением биологического оружия.

РХБ угрозы террористического характера

Учитывая сложившуюся геополитическую обстановку, вероятность совершения терактов РХБ направленности увеличивается. Такая вероятность, прежде всего, обусловлена колоссальным психологическим эффектом, который они способны создать.



Рисунок 2 – Образцы беспилотных летательных аппаратов, оснащенных емкостями и оборудованием для распыления рецентур (URL: <https://smotrim.ru/article/2997393>; дата обращения: 25.05.2022)

Существует опасность проведения террористических актов как с провоцированием аварий на РХБ опасных объектах, так и с применением преимущественно химических и биологических веществ в местах массового скопления населения.

В первом случае последствия сравнимы с техногенными авариями, алгоритм ликвидации которых достаточно широко описан в существующих методических документах. Второй случай более опасен и имеет свои особенности.

При совершении террористических актов в местах массового пребывания населения с использованием опасных химических веществ наиболее вероятно применение таких веществ, которые обладают наибольшим ингаляционным токсическим действием, имеют малый период скрытого действия, а также которые легко изготовить в производственных и лабораторных условиях или приобрести под видом использования для бытовых нужд.

Ничтожно малые инфицирующие дозы возбудителей инфекционных болезней и токсинов, отсутствие высокочувствительных и специфичных методов и средств экспресс-индикации микроорганизмов в пробах из объектов окружающей среды, недостаточная эффективность средств общей и экстренной профилактики и патогенетического лечения определяют потенциальную угрозу использования биологических поражающих агентов в террористических целях.

Наиболее опасный вариант биологического и химического терроризма сводится к скрытому (диверсионному) распространению аэрозоля биологического поражающего агента или токсичного химического вещества в местах массового скопления людей, что может привести к возникновению трудно объяснимых на начальном этапе симптомов и вызвать общую



Рисунок 3 – Интегрированная дорожная карта развития беспилотных систем на период 2013–2038 годов, США (URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc949794/>; дата обращения: 02.06.2022)

панику, создав при этом крайне напряженную социальную и эпидемиологическую обстановку.

Из доклада начальника войск РХБ защиты ВС РФ генерал-лейтенанта Кириллова Игоря Анатольевича, что во время спецоперации на территории Украины были выявлены факты работы с рецептурами, которые являются потенциальными агентами биооружия⁶.

Кроме этого, на Украине были обнаружены несколько образцов БЛА, оснащенных емкостями и оборудованием для распыления рецептур (рисунок 2).

Вышеизложенное свидетельствует о реальной угрозе применения противником токсичных химикатов и биологических агентов и делает крайне актуальным рассмотрение вопроса противодействия подобным угрозам.

2. Анализ состояния развития и применения зарубежных беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач радиационной, химической и биологической безопасности

⁶ МО РФ: на Украине нашли еще 10 беспилотников с 30-литровыми емкостями и оборудованием для распыления. URL: <https://tvzvezda.ru/news/20225111626-1OBNP.html?ysclid=lbgrh3uulos269626145> (дата обращения: 02.12.2022).

⁷ Беспилотные летательные аппараты (БЛА) зарубежных стран. Разработка и основные модели. URL: <http://www.modernarmy.ru/article/152> (дата обращения: 18.05.2022).

Мировым лидером по развитию и внедрению беспилотных технологий являются США и Израиль. В декабре 2013 года Пентагон выпустил «Интегрированную дорожную карту развития беспилотных систем на период 2013–2038 гг.», в которой сформулированы перспективы и цели в сфере развития РТК ВН на 25 лет вперед, а также определяются направления и способы достижения этих целей Министерством обороны и промышленностью США⁷ (рисунок 3).

Анализ распределения финансирования на развитие робототехнических систем Минобороны США свидетельствует, что 90 % всех расходов идут на БЛА, чуть более 9 % – на морские и около 1 % – на наземные РТК военного назначения. Это наглядно отражает направления сосредоточения основных усилий в области военной робототехники эвентуального противника.

Одним из основополагающих подходов к разработке беспилотных систем в армии США является использование общих стандартов в программном, системном и сервисном обеспечении.

Курс действий министерства обороны США по выполнению данной задачи заключается в использовании и совершенствовании всех доступных технологий и поиске оптимальной системы взаимозаменяемых архитектур.

Модульность и взаимозаменяемость программных, микропрограммных и аппаратных компонентов позволит избежать многих трудностей при применении БЛА в условиях боевой обстановки.

Ожидается, что в ближайшем будущем количество датчиков, скорость сбора и объем данных, получаемых БЛА на поле боя, будут продолжать экспоненциально увеличиваться. Это создает проблему обработки массивов данных и вызывает необходимость их предварительной обработки, а также анализа и объединения данных, с привязкой к оперативному времени в целях обеспечения военнослужащих своевременной информацией, необходимой для принятия решений, что, в конечном счете, обеспечивает техническое преимущество на поле боя.

Кроме финансируемых государственных программ, в США наблюдается стремительное развитие инициативных разработок в области конструирования БЛА, в том числе и для обеспечения мероприятий РХБ безопасности. Приведем некоторые «открытые» примеры, обнаруженные в результате патентного поиска



Рисунок 4 – Беспилотный летательный аппарат «Хантер», США–Израиль (URL: <https://www.suasnews.com/2014/03/mq-5b-hunter-drone-from-66th-us-brigade-captured-intact-by-russian-forces/>; дата обращения: 02.06.2022)



Рисунок 5 – Беспилотный летательный аппарат «Феникс», Великобритания (URL: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8096831/bae-systems-phoenix-unmanned-aerial-vehicle>; дата обращения: 02.06.2022)

в данной исследуемой области. «Портативное устройство для отбора проб биологических частиц, находящихся в воздухе» [4], «Отбор проб окружающей среды с помощью БЛА» [5], «Система БЛА для мониторинга окружающей среды» [6], «Сборщики аэрозольных агентов, способы, системы и устройства для мониторинга аэрозольных агентов» [7] и др.

Теперь рассмотрим наиболее успешные зарубежные БЛА, прямо или косвенно предназначенные для решения задач РХБ безопасности.

Целевая нагрузка БЛА «Хантер» (англ. – Hunter, «Охотник»), разработанного совместно США и Израилем, состоит из оптических и тепловых датчиков, лазерного дальномера-целеуказателя, средств радиационно-химической разведки. Вся полезная нагрузка размещается в съемных модулях. Типовыми задачами «Хантера» являются разведка, наблюдение и целеуказание на поле боя и в ближнем тылу, РХБ разведка, радиоэлектронное противодействие (рисунок 4).

В Великобритании по заказу сухопутных войск разработан комплекс с БЛА «Феникс» (англ. – Phoenix). Его основными задачами являются разведка поля боя, наблюдение, обнаружение, распознавание, слежение в реальном масштабе времени и целеуказание круглосуточно в интересах артиллерийского полка и реактивных систем залпового огня. Кроме этого, на БЛА «Феникс» могут возлагаться задачи по осуществлению радиоэлектронной разведки, радиоэлектронного подавления, ретрансляции, ведения РХБ разведки (рисунок 5).

Американской компанией «NevadaNano» разработан и успешно продемонстрирован БЛА с бортовым химическим зондированием. В рамках демонстрации «NevadaNano» пе-



Рисунок 6 – Беспилотный летательный аппарат коптерного типа «ExynAero» (URL: <https://www.exyn.com/products/exyn-aero-aerial-mapping-drone>; дата обращения: 27.04.2022)

реботала свою систему Molecular Property Spectrometer (MPS) для определения нескольких химических веществ в небольшой 110-граммовый комплект. Технология обнаружения газов MPS идеально подходит для применения в воздухе ввиду своей функциональности и небольшой массы.

Компания «Exyn Technologies» (США) разработала БЛА коптерного типа «ExynAero» (рисунок 8).

Весомыми преимуществами данного БЛА по сравнению с другими являются его абсолютная автономность, ограниченная лишь энергоемкостью элемента питания, возможность работы в условиях ионизирующих излучений, а также возможность выполнения полетных заданий в условиях отсутствия систем геопозиционирования. БЛА «ExynAero» позволяет объединять несколько потоков данных с различных датчиков (в том числе с лидарного⁸)

⁸ Лидарные датчики используются для лазерного сканирования объектов, измерения расстояния, навигации в закрытом пространстве, обхода препятствий, распознавания жестов, отслеживания объектов, изме-



Рисунок 7 – Беспилотный летательный аппарат – синхронтер с роботизированным манипулятором (URL: https://www.dlr.de/content/de/bilder/2016/1/aufnahme-und-transport-eines-mobilen-inspektionsroboters-mit-hilfe-eines-fliegenden-leichtbau-roboterarms-mit-sieben-freiheitsgraden_22187.html; дата обращения: 05.05.2022)



Рисунок 8 – Беспилотный летательный аппарат мультироторного типа «SR-SF6» от компании «Skyrobotics» (URL: <https://skyrobotic.com/wp-content/uploads/2016/07/skyrobotic-brochure-SR-SF6.pdf>; дата обращения: 05.05.2022)

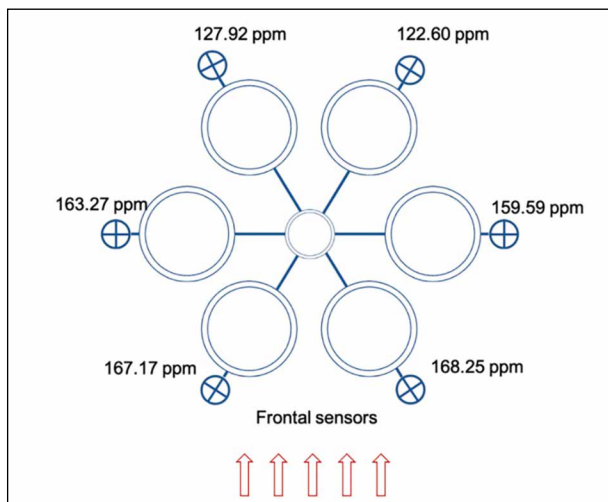


Рисунок 8 – Схема расположения химических детекторов на борту беспилотного летательного аппарата мультироторного типа «SR-SF6» (URL: <https://doi.org/10.3390/drones5030069>; дата обращения: 05.05.2022)

в режиме реального времени, в результате чего бортовой компьютер БЛА распознает геометрические параметры замкнутого пространства и производит радиационную разведку в замкнутых радиационно-опасных объектах.

Инженерами Германского аэрокосмического центра разработан БЛА – синхронтер, оснащенный роботизированным манипулятором с семью степенями свободы. Манипулятор способен захватывать предметы массой до восьми килограммов. Он оборудован силовыми датчиками, благодаря которым

регулируется сила сжатия, что важно при захвате хрупких предметов (рисунок 7).

В настоящее время точность роботизированного манипулятора составляет несколько сантиметров, но в будущем ее планируется повысить до миллиметров. Для поиска и подлета к точке выполнения задач БЛА использует данные GPS. Уже на месте он переключается на систему видеонаведения высокой четкости, состоящей из нескольких камер⁹.

Конечной целью проекта «Aeroarms», в рамках которого и разработан БЛА – синхронтер, является создание БЛА с несколькими манипуляторами, которые можно будет использовать для обследования инфраструктурных объектов, а также обслуживания и ремонта других роботов.

Однако уже сейчас возможности разработанного БЛА – синхронтера могут найти широкое применение при выполнении мероприятий предотвращения и ликвидации РХБ угроз.

Специалистами Римского университета проведены исследования по численному моделированию аэродинамики воздушных потоков, генерируемых БЛА мультироторного типа (рисунок 8). Целью исследований было определение оптимального расположения химических детекторов на борту БЛА с учетом вихрей, создаваемых пропеллерами БЛА (рисунок 9).

В рамках исследований моделировалось заражение воздуха аммиаком и анализировалась чувствительность химических детекторов, размещенных в различных частях БЛА.

Построенное учеными поле концентраций аммиака вокруг БЛА с учетом движения воздушных масс позволило определить радиальную конфигурацию химических детекторов

рения объемов, измерения высоты, 3D съемки местности т.д.

⁹ Немцы скрестили дрон с роборукой. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/03/09/drone> (дата обращения: 05.05.2022).

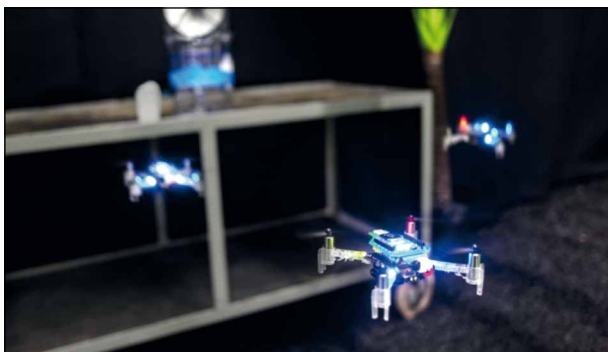


Рисунок 10 – Групповое применение беспилотных летательных аппаратов для нахождения утечки аэрозоля (URL: <https://nplus1.ru/news/2021/07/19/drone-gas?ysclid=lbi5r0g1mx487705567>; дата обращения: 06.05.2022)

как оптимальное решение для обнаружения выброса токсичных веществ. Результаты моделирования подтвердили, что радиальное расположение химических датчиков по окружности БЛА более эффективно, чем их расположение в центральной части БЛА [8].

Данные исследования представляют интерес для специалистов при обеспечении химической безопасности и мониторинга окружающей среды на предприятиях химической промышленности.

Инженеры из Нидерландов, Испании и США в определении концентрации вредных примесей предложили способ группового применения БЛА. Исследования показали, что для решения этой задачи целесообразнее использовать группу БЛА, компенсирующих своим количеством и коллективным взаимодействием одиночный БЛА с большой вычислительной мощностью.

Группа небольших БЛА способна самостоятельно находить утечку аэрозольных примесей в помещениях. Благодаря применению лазерных дальномеров и специального алгоритма, они успешно справляются с определением источника утечки. Во время полета БЛА обмениваются данными о концентрации примеси и благодаря этому ищут новые оптимальные точки для поиска утечки (рисунок 10).

Инженеры протестировали группу БЛА в четырех замкнутых помещениях размером 10 на 10 м с источником утечки изопропанола. В 11 из 12 тестов группе БЛА удалось локализовать источник с точностью до 2 м^{10} .

Одним из примеров реального применения БЛА для мониторинга обстановки и лик-



Рисунок 11 – Радиационный мониторинг с использованием беспилотного летательного аппарата на АЭС «Фукусима-дайити» (URL: <https://www.atomic-energy.ru/files/styles/center/public/images/2021/02/drone-1140x6401.jpg?itok=hGVy6d-Y>; дата обращения: 06.05.2022)

видации последствий аварий на РХБ опасных объектах является ядерная авария на АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 г.¹¹

Радиационно загрязненная территория, находящаяся в непосредственной близости от реактора, создает серьезную опасность для персонала при осуществлении радиационного мониторинга.

В связи с этим МАГАТЭ и префектура Фукусима в 2012 г. начали совместную работу по разработке и применению БЛА для радиационного мониторинга (рисунок 11).

Выполнение данной задачи проходило в два этапа:

- предоставление полной контрольно-измерительной системы на базе БЛА для измерения уровня радиации – системы мониторинга радиации с возможностью обработки и хранения данных, разработанной и созданной в лаборатории ядерной науки и приборостроения (NSIL) МАГАТЭ;

- предоставление методологии анализа и интерпретации после измерений, а также обучение персонала как в префектуре Фукусима, так и в Лаборатории NSIL в Зайберсдорфе, Австрия, порядку и правилам применения БЛА и специальной полезной нагрузкой.

В настоящее время МАГАТЭ работает над интеграцией и испытаниями нового улучшенного оборудования, включая его адаптацию к БЛА следующего поколения.

Также на «Фукусима-дайити» были применены БЛА вертолетного типа

T-Hawk французской компании Helipse, разработанные в рамках одной из перспек-

¹⁰ Рой дронов локализовал утечку газа. URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/bpla/7979/> (дата обращения: 19.05.2022).

¹¹ МАГАТЭ и префектура Фукусимы разработали инновационную систему радиационного мониторинга с помощью летательных дронов. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/02/02/111080?ysclid=lbgtrwtj89141409870> (дата обращения: 19.05.2022).



Рисунок 12 – Беспилотный летательный аппарат вертолетного типа T-Hawk французской компании Helipse (URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/RQ-16_T-Hawk; дата обращения: 05.05.2022)

тивных исследовательских программ Пентагона (рисунок 12).

Данные, собранные с помощью систем БЛА с места аварии на АЭС «Фукусима-дайти», могут быть использованы для оценки потенциальных радиационных угроз и помощи в разработке соответствующих планов и стратегий ликвидации радиоактивного загрязнения территорий, дезактивации и обращения с радиоактивными отходами в Японии.

Учитывая современное состояние вопроса в области развития БЛА иностранных государств, в ближайшем будущем ожидаются новые крупные разработки, среди которых – увеличение массы специальной полезной нагрузки, интеграция детекторов и датчиков, улучшенная самонавигация, а также способ-

ность БЛА работать в группе, в том числе и с наземными системами.

3. Анализ состояния развития и применения отечественных беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач радиационной, химической и биологической безопасности

Выявление и оценка РХБ обстановки как при угрозе, так и при возникновении чрезвычайных ситуаций РХБ характера обеспечиваются современными системами и средствами их мониторинга и прогнозирования.

Одним из таких средств, безусловно, являются перспективные робототехнические комплексы с БЛА.

Применение робототехнических комплексов с БЛА для обеспечения РХБ безопасности при ЧС позволяет производить:

- ведение видео- и фотосъемки разрушенного (аварийного) РХБ опасного объекта;
- ведение над зоной аварии температурного, газового и других видов контроля;
- передачу органам управления и войскам необходимой информации в реальном масштабе времени;
- графическую и звуковую индикацию при превышении допустимых норм РХБ заражений;
- составление температурной карты РХБ объекта;
- забор и доставку проб с РХБ зараженных объектов;
- ликвидацию последствий аварий на РХБ опасных объектах и пр.¹²

В 2005 году на снабжение войск РХБ защиты приняты модули целевой воздушной и химической разведки химической и радиаци-



А



Б

Рисунок 13 – Беспилотный летательный аппарат «Пчела» (А); целевые нагрузки воздушной радиационной и химической разведки (Б) (URL: <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-71-82>; дата обращения: 07.05.2022)

¹² Современные проблемы создания и эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов в системе МЧС России (2019; Химки). Сборник трудов секции № 10 XXIX Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь», 21 марта 2019 г. Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2019. 82 с.

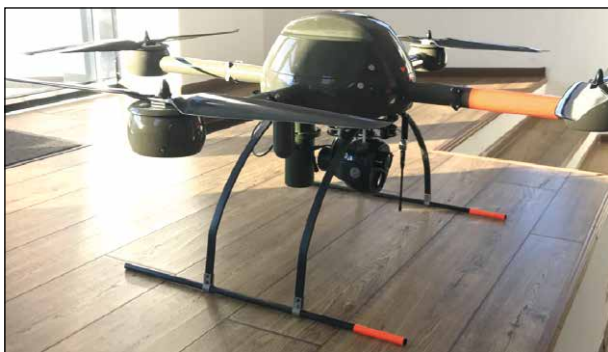


Рисунок 14 – Комплекс воздушной радиационной разведки местности на базе БЛА коптерного типа «Гранад - ВА 1000» (URL: <http://ntcpoisk.ru/kompleks-vozdushnoy-radiatsionnoy-razvedki-mestnosti>; дата обращения: 23.04.2022)



Рисунок 15 – Беспилотный летательный аппарат самолетного типа «Орлан-10» (URL: <https://mirtesen.ru/dispute/43901336759/V-Sirishbili-rossiyskiy-BPLA-Orlan-10-?id=comment-reply43901336759>; дата обращения: 25.04.2022)

онной разведки¹³ для БЛА «Пчела» (комплекс 576), представленные на рисунке ¹³.

Модуль целевой воздушной радиационной разведки предназначен для ведения воздушной радиационной разведки, в том числе в районах аварий АЭС и других объектов с ядерными энергетическими установками и устройствами, а также ведения визуальной разведки.

Модуль целевой воздушной химической разведки предназначен для ведения воздушной химической разведки при применении противником фосфорорганических веществ, в районах аварий химических предприятий и объектов с выбросом в атмосферу АХОВ, а также для ведения визуальной разведки.

Опытно-практическая эксплуатация данных целевых модулей показала их невысокую эффективность ввиду недостаточных технических возможностей встроенных приборов радиационной и химической разведки, однако в целом их разработка явилась необходимым шагом в области развития средств выявления РХБ обстановки воздушного базирования [9].

Так, в настоящее время в состав оборудования современной специальной машины войск РХБ защиты РХМ-9 входит робототехнический комплекс (комплекс воздушной радиационной разведки местности) с БЛА коптерного типа «Гранад ВА-1000», способный нести комплект датчиков, которые могут установить очаги радиационного загрязнения¹⁴ (рисунок 14).

Комплекс воздушной радиационной разведки местности на базе БЛА «Гранад ВА-1000» позволяет вести радиационную разведку местности на высотах до 300 м в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режиме управления.

В ближайшее время в интересах войск РХБ защиты ВС РФ планируются к вводу в эксплуатацию перспективный мобильный многоцелевой робототехнический комплекс МРК-РХБЗ в составе двух наземных робототехнических средств и двух БЛА самолетного типа «Орлан-10» с комплектами сменного навесного оборудования¹⁵ (рисунок 15).

Преимуществом БЛА самолетного типа, по сравнению с БЛА коптерного типа, является экономичность запаса хода, обусловленная обтекаемой формой корпуса и возможностью планирования.

Радиус действия БЛА «Орлан-10» из состава многоцелевого робототехнического комплекса МРК-РХБЗ по передаче информации составляет до 25 км. Кроме того, данные БЛА способны выполнять задачи как самостоятельно – в автоматическом режиме, так и под управлением оператора.

Последнее позволяет применять БЛА «Орлан-10» для РХБ разведки и оповещения о РХБ опасностях как в мирное, так и военное время. От момента начала научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до изготовления опытного образца БЛА, а тем более постановки его на вооружение, проходит

¹³ Приказ МО РФ от 11 февраля 2005 г. № 46 «О принятии на снабжение ВС РФ нагрузки целевой воздушной радиационной разведки НРР для комплекса 576 и нагрузки целевой воздушной химической разведки НХР для комплекса 576».

¹⁴ Машина радиационной, химической и биологической разведки РХМ-9. URL: <https://iz.ru/677722/2017-12-01/mashina-radiatsionnoi-khimicheskoi-i-biologicheskoi-razvedki-rkxm-9> (дата обращения: 11.06.2020).

¹⁵ Приказ МО РФ от 11 февраля 2005 г. № 46 «О принятии на снабжение ВС РФ нагрузки целевой воздушной радиационной разведки НРР для комплекса 576 и нагрузки целевой воздушной химической разведки НХР для комплекса 576».



Рисунок 16 – Программно-технический комплекс радиационной и химической разведки на беспилотном летательном аппарате (URL: <https://www.burstroy.ru>; дата обращения: 29.04.2022)

до 10 лет. Между тем, постоянно развивающиеся элементная и производственная базы приводят к динамическому развитию количества инициативных разработок отечественных БЛА. С каждым годом на международном военно-техническом форуме «Армия» демонстрируется все больше новых образцов БЛА, разработанных российскими компаниями в инициативном порядке со значительно более широкими возможностями и лучшими характеристиками по сравнению с образцами, стоящими на вооружении ВС РФ.

Одним из крупнейших производителей БЛА в РФ является группа компаний «ZALA AERO», образованная в 2004 г. в г. Ижевске. «ZALA AERO» – один из отечественных производителей, который полностью обеспечивает весь цикл создания, разработки и эксплуатации БЛА. Данной группой компаний разработано более 450 комплексов с БЛА для различных организаций и ведомств РФ.

Также лидирующими производителями БЛА в РФ являются компании «НЕЛК», «Supercam», «Грифон». Этими и другими компаниями производятся десятки образцов БЛА различных типов и предназначения.

Довольно большой перечень комплексов с БЛА, предназначенных, в том числе, для предотвращения и ликвидации РХБ угроз состоит на оснащении подразделений МЧС России. Это комплексы с БЛА самолетного типа: «ZALA 421-04», «ZALA 421-08», «ZALA 421-16EM», «Supercam S-250», «Орлан-10»; коптерного типа: «ZALA 421-21», «ZALA 421-22»; «НЕЛК-В6», «Гранад ВА-1000», «Supercam S6 «Серафим», «Supercam X8M».

Отдельно необходимо отметить такую инициативную отечественную разработку, как мобильный программно-технический ком-

плекс радиационной и химической разведки на БЛА (рисунок 16).

Комплекс довольно прост в производстве и эксплуатации, имея при этом широкие возможности по детектированию ионизирующих излучений и идентификации различных отравляющих и аварийно-опасных химических веществ в атмосфере.

Военная академия РХБ защиты не остается в стороне от развития такого научно-технического направления, как обеспечение РХБ безопасности с помощью БЛА. В последние годы специалистами Академии получен ряд патентов на изобретения и полезные модели в рассматриваемой предметной области. Среди них:

«Устройство пробоотбора аэрозолей биологических рецептур для малоразмерных БЛА коптерного типа» [10];

«Устройство для автоматизированного отбора проб рыхлого грунта» [11];

«Термоконтейнер для доставки биопроб малоразмерными БЛА» [12];

«Устройство для дистанционного отбора проб грунта с использованием БЛА коптерного типа» [13].

В конечном счете, применение тех или иных РТК с БЛА для решения задач по обеспечению РХБ безопасности обусловлено спецификой задач и масштабами происшествия, ограничиваясь при этом лишь технико-экономическими показателями эффективности применения самого БЛА и его целевых нагрузок.

В целях принятия оптимального решения о целесообразности закупки и принятия на вооружение войсками РХБ защиты образцов РТК с БЛА необходимы организация и проведение комплексных сравнительных испытаний нескольких образцов БЛА, близких по своим техническим характеристикам, а также испытаний каждого из образцов по определению соответствия заявленным характеристикам.

В ВС РФ испытания опытных образцов военной техники регламентировано ГОСТ¹⁶, определяющим проведение предварительных испытаний и реализацию их результатов, а также основной состав документов, применяемых в процессе испытаний, и общие правила их оформления. Сущность подхода к проведению испытаний обусловлена необходимостью выявления из большого модельного ряда предлагаемых разработчиками БЛА таких образцов, которые бы в наибольшей степени удовлетворяли специфическим требованиям для решения задач войсками РХБ защиты и ВС РФ в целом.

¹⁶ ГОСТ РВ 0015.210-2020. Военная техника. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов изделий.

Заключение

При создании и принятии на вооружение комплексов с БЛА необходимо учитывать роль и место таких комплексов в перспективной системе вооружения ВС РФ, реальные возможности предприятий промышленности, участвующих в создании и эксплуатации этих комплексов на всех этапах их жизненного цикла, в том числе накопленный этими предприятиями научно-технический задел, а также реальные возможности финансирования разработки и строительства этого вида военной техники.

Направлениями дальнейшего развития РТК с БЛА войск РХБ защиты и других ведомств, задействованных в обеспечении РХБ безопасности РФ, являются:

- разработка и принятие на вооружение семейства доступных, универсальных и эффективных БЛА, единых для всех видов и родов войск;
- разработка специализированных целевых (полезных) нагрузок, пригодных к использованию на любом типе БЛА;
- создание унифицированных креплений, узлов, агрегатов и протоколов передачи данных;
- рационализация массогабаритных характеристик, а также развития и внедрения новых принципов и методов регистрации и обнаружения радиоактивных веществ, токсичных химикатов и биологических средств.

Таким образом, результаты анализа состояния развития и применения РТК с БЛА отечественного и зарубежного производства позволяют сделать вывод о необходимости их рациональной и прогрессивной интеграции в систему вооружения и средств РХБ защиты в целях обеспечения РХБ безопасности войск и населения.

Сравнительный анализ показал, что в сфере создания и применения РТК с БЛА Рос-

сийская Федерация пока еще, к сожалению, значительно отстает от передовых в военно-техническом отношении государств – прежде всего, от США и Израиля.

Прогнозируя постепенное оснащение подразделений войск РХБ защиты образцами РТК с БЛА, основными задачами РХБ защиты, решаемыми БЛА как отдельно, так и во взаимодействии с наземными РТК, могут стать: РХБ разведка; РХБ контроль; отбор проб, транспортировка отобранных проб в полевые лаборатории; сбор, обработка и передача данных о ядерных взрывах и РХБ обстановке в масштабе, близком к реальному времени; визуальный, температурный и газовый контроль при ликвидации последствий аварий на РХБ опасных объектах и др.

В настоящее время разработка перспективных образцов вооружения и средств РХБ защиты идет в направлении внедрения автоматизированных систем управления, создания РТК специального назначения, в том числе и с БЛА, оснащенных соответствующей целевой нагрузкой, что позволит значительно увеличить возможности по выполнению задач РХБ защиты (безопасности).

Подводя итог, можно с уверенностью говорить о том, что применение РТК с БЛА для решения задач обеспечения РХБ безопасности в целом способны эффективно дополнить систему технических средств предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций РХБ характера. Безусловным достоинствами РТК с БЛА являются возможность их применения в неблагоприятных условиях внешней среды, снижение риска потерь высококвалифицированного личного состава (персонала) при относительно низкой стоимости.

Вклад авторов / Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и РИНЦе.

Финансирование

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» Министерства обороны Российской Федерации.

Литература для самоподготовки // List of sources used for self-study

1. Аккузин К.Н., Макеев Е.С. История развития и применения робототехники при ликвидации последствий аварий на радиационно опасных объектах (лекция) // Вестник войск РХБ защиты. 2021. Т. 5. № 2. С. 149–164. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-2-149-164>
1. Akkuzin K.N., Makeev E.S. The history of the development and application of robotics in the elimination of consequences at radiation-hazardous facilities (lecture) // Journal of NBC Protection Corps. 2021. V. 5. № 2. P. 149–164. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-2-149-164>. (in Russian).
2. Ганин С.М., Карпенко А.В., Колногоров В.В., Петров Г.Ф. Беспилотные летательные аппараты. Издательство: «Невский Бастион». М.: 1999.
2. Ganin S.M., Karpenko A.V., Kolnogorov V.V., Petrov G.F. Unmanned aerial vehicles. Publisher: Nevsky Bastion. M.: 1999. (in Russian).
3. Шевченко А.В. Стратегия реализации Концепции радиационной, химической и биологической защиты населения (часть первая) // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13. № 2 (48). С. 66–72. (in Russian).
3. Shevchenko A.V. Strategy for implementation of the concept of radiation, chemical and biological protection of population (part one) // Civil Security Technology. 2016. V. 13. № 2 (48). P. 66–72.
4. Patent US. No. US 7,998,731 B2 (2011).
5. Patent US. No. US 8,820,672 B2 (2014).
6. Patent US. No. US 10, 175, 151 B2 (2019).
7. Patent US. No. US 11,112,339 B2 (2021).
8. Marturano F., Martellucci L., Chierici A. et al. Numerical fluid dynamics simulation for drones' chemical detection // Drones. 2021. V. 5. P. 69. <https://doi.org/10.3390/drones5030069>
9. Аккузин К.Н. Робототехнические комплексы (средства) войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации (лекция) // Вестник войск РХБ защиты. 2021. Т. 5. № 1. С. 71–82. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-71-82>
9. Akkuzin K.N. Robotic complexes (facilities) of Nuclear Biological Chemical Defence Corps of the Armed Forces of the Russian Federation (lecture) // Journal of NBC Defence. 2021 V. 5. № 1. P. 71–82. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-1-71-82> (in Russian).
10. Патент на полезную модель. РФ № 190221U1, заявка № 20181192216 (2018).
10. Utility model patent RU. No. 190221U1, application No. 20181192216 (2018). (in Russian).
11. Патент на полезную модель РФ. № 204682U1, заявка № 2020136963 (2020).
11. Utility model patent RU. No. 204682U1, application No. 2020136963 (2020). (in Russian).
12. Патент на полезную модель РФ. № 204795U1, заявка № 2020129729 (2020).
12. Utility model patent RU. No. 204795U1, application No. 2020129729 (2020). (in Russian).
13. Патент на полезную модель РФ. № 210641U1, заявка № 2021135005 (2021).
13. Utility model patent RU. No. 210641U1, application No. 2021135005 (2021). (in Russian).

Об авторах

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» Министерства обороны Российской Федерации, 156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16.

Аккузин Константин Николаевич. Начальник отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) ВА РХБЗ, канд. воен. наук.

Макеев Евгений Сергеевич. Начальник научно-исследовательской лаборатории (обоснования исходных данных для планирования развития системы вооружения и средств РХБ защиты) ВА РХБЗ, канд. тех. наук..

Контактная информация для всех авторов: varhbz@mil.ru
Контактное лицо: Аккузин Константин Николаевич; varhbz@mil.ru

Analysis of the Development and Use of Unmanned Aerial Vehicles Designed for NBC Protection Purposes

K.N. Akkuzin, E.S. Makeev

Federal state Public Military Education Institution of Higher Education «Military Academy of Nuclear, Biological and Chemical Defence named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko» of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 16 Gorky Street, Kostroma 156015, Russian Federation

Received June 30, 2022 г. Accepted December 23, 2022

The lecture is intended for training specialists in higher educational establishments according to the Federal state standard «Robotics for military and special purposes» and also for training operators of robotic complexes (facilities) for military purposes in training centers and military units.

The lecture addresses three questions:

- 1) Analysis of sources of radiation, chemical and biological threats in the Russian Federation.
- 2) Analysis of the development and use of foreign unmanned aerial vehicles designed for NBC protection purposes.
- 3) Analysis of the development and use of Russian unmanned aerial vehicles designed for NBC protection purposes.

Keywords: *unmanned aerial vehicles; NBC safety and security; system of weapons and means of NBC protection.*

For citation: *Akkuzin K.N., Makeev E.S. Analysis of the Development and Use of Unmanned Aerial Vehicles Designed for NBC Protection Purposes (lecture) // Journal of NBC Protection Corps. 2022. V. 6, № 4. P. 372-385. EDN: HAVVLU. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-372-385>*

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. Federal State Public Military Education Institution of Higher Education «Military Academy of Nuclear, Biological and Chemical Defence named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko» of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

References

See P. 384.

Authors

Federal State Public Military Education Institution of Higher Education «Military Academy of Nuclear, Biological and Chemical Defence named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko» of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 16 Gorky Street, Kostroma 156015, Russian Federation.

Konstantin Nikolayevich Akkuzin. Chef of Department of Scientific Work Organization of the Academy. Candidate of Military Sciences.

Evgeny Sergeevich Makeev. Chief of the Research Laboratory (on the Substantiation of the Initial Data for Planning the Development of the Weapons System and Means of NBC Protection) of the Academy. Candidate of Technical Sciences.

Contact information for all authors: varhbz@mil.ru

Contact person: Konstantin Nikolayevich Akkuzin; varhbz@mil.ru

Научная рота войск радиационной, химической и биологической защиты

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022
УДК 358.39: 54: 355.232
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-386-390>
<https://elibrary.ru/hcalse>



Е.А. Чугунов, К.Н. Аккузин, Р.В. Никифоров, И.С. Горохов

*Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» Министерства обороны Российской Федерации
156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16*

Поступила 25.10.2022 г. Принята к публикации 23.12.2022 г.

В соответствии с решением Президента Российской Федерации с 2013 г. в Вооруженных силах России началось создание научных рот. В 2015 г. такая рота создана в войсках радиационной, химической и биологической защиты в составе Военной академии радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома). *Цель работы* – показать историю создания научной роты, порядок комплектования, организацию и основные показатели результативности ее научно-исследовательской деятельности. Отбор кандидатов проводится на основании перечня направлений подготовки (специальностей) высшего образования кандидатов в научные роты, утвержденного Управлением начальника войск РХБ защиты. Основными критериями при отборе кандидатов являются способность вести самостоятельную научную деятельность в профильных направлениях, а также научный потенциал кандидата. Средний балл успеваемости отобранных кандидатов, как правило, составляет не менее 4,7. С молодым пополнением научной роты после очередного призыва осваивается программа боевой подготовки военнослужащих ВС РФ, впервые поступивших (призванных) на военную службу. Затем молодое пополнение роты приводится к Военной присяге. За каждым военнослужащим закреплен научный руководитель из числа научно-педагогических работников, имеющих ученую степень и ученое звание, а также практический опыт выполнения научных исследований. После окончания службы военнослужащим предоставляется возможность: заключить контракт о прохождении военной службы с присвоением воинского звания «лейтенант»; остаться в качестве научного работника в вузах и научно-исследовательских организациях МО РФ с последующей возможностью защиты диссертации и присвоением ученого звания кандидат наук; трудоустроиться в научных организациях, входящих в состав военно-промышленного комплекса России.

Ключевые слова: боевая подготовка; войска РХБ защиты; коронавирусная инфекция; Международный военно-технический форум «АРМИЯ»; научная рота; научно-исследовательская деятельность; профессиональная ориентация.

Библиографическое описание: Чугунов Е.А., Аккузин К.Н., Никифоров Р.В., Горохов И.С. Научная рота войск радиационной, химической и биологической защиты // Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т 6. № 4. С. 386–390. EDN: HCALSE. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-6-4-386-390>

Научные роты призваны стать одним из надежных и эффективных кадровых механизмов¹. Основная цель их создания определяется задачами модернизации Российской армии, задачами обеспечения постоянного повышения уровня обороноспособности страны, развития и совершенствования ее промышленного

(и прежде всего, оборонно-промышленного) комплекса. Реализация проекта нацелена на привлечение в ряды ВС РФ значительного количества талантливых и квалифицированных молодых специалистов, владеющих дефицитными компетенциями, необходимыми для разработки новых образцов вооружения, во-

¹ Научная рота – Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (<https://varhbz.mil.ru/folder/5983>; дата обращения: 03.10.2022).

енной и специальной техники, рационального использования интеллектуального ресурса в интересах обеспечения обороноспособности государства.

Цель работы – показать историю создания научной роты в составе Военной академии радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (далее – ВА РХБ защиты), порядок комплектования, организацию и основные показатели результативности ее научно-исследовательской деятельности.

История создания научной роты. Научные роты – изобретение не российское. Еще в 1980-е гг. на воротах посольства Китайской Народной Республики в Москве красовался большой стенд с фотографиями, призванными представить наилучшим образом жизнь Китая. На одном из таких снимков были запечатлены «бойцы научно-исследовательского батальона Народно-освободительной армии Китая»: двое юношей, один из них – «очкарик», но в военной форме (времен Мао Цзэдуна). В руках у солдат – элегантные металлические предметы, относящиеся к научно-техническому инвентарю.

В настоящее время военно-научные подразделения существуют и в ВС РФ. В 2015 г. такая рота сформирована на базе ВА РХБ защиты. Это подразделение осуществляет подготовку научных кадров для военно-научного и оборонно-промышленного комплексов, а также для проведения научных исследований в области реализации научно-прикладных задач по вопросам развития, применения и обеспечения войск РХБ защиты ВС РФ.

Первый призыв в ряды научной роты состоялся 28 октября 2015 г. У истоков ее создания стоял начальник ВА РХБ защиты полковник (ныне – генерал-лейтенант) И.А. Кириллов, командиром роты был назначен капитан (ныне – подполковник) Д.В. Трунилов. В процессе формирования подразделения рассматривались анкеты претендентов со всех уголков страны. К отбору кандидатов привлекались высококвалифицированный научный состав академии и научно-исследовательских организаций войск РХБ защиты. В итоге были отобраны кандидаты из таких регионов России, как: Московская, Костромская, Ярославская, Кировская, Владимирская, Белгородская и Ивановская области, а также Республики Удмуртия и Башкортостан. С каждым годом география наборов становится все шире. В научную роту войск РХБ защиты набирают выпускников высших учебных заве-

дений в возрасте до 27 лет, желающих проходить действительную военную службу по призыву.

Комплектование научной роты. Работа по отбору кандидатов организована в соответствии с «Положением о научных ротах Вооруженных Сил Российской Федерации», «Инструкцией по отбору кандидатов в научные роты Вооруженных Сил Российской Федерации»² и планом профагитационной работы научной роты.

Отбор производится в 3 этапа. *На первом* из них в ходе военно-профессионального просвещения выявляются лица, проявившие интерес к военной службе, с которыми в последующем проводится военно-профессиональное консультирование, в ходе которого с учетом личностных качеств кандидата оказывается помощь в выборе профиля научных исследований;

на втором – представителями отборочной комиссии осуществляются изучение и предварительный отбор граждан в военных комиссариатах по материалам, находящимся в личных делах, на основании удостоверений на право изучения, сопровождения (военно-профессионального ориентирования) и отбора. Отбор кандидатов проводится с учетом наличия 50% резерва;

на третьем – происходит составление рейтингового списка кандидатов, протокола, оценочного листа и представление их установленным порядком в Военно-научный комитет (далее – ВНК) ВС РФ через Управление начальника войск (далее – УНВ) РХБ защиты.

ВНК ВС РФ анализирует и обобщает представленную документацию на кандидатов, определяет соответствие профиля их подготовки профилю научных исследований и направляет предложения по комплектованию научных рот и соответствующие списки кандидатов в Главное организационно-мобилизационное управление ГШ ВС РФ, которое через штабы военных округов и военные комиссариаты организует планирование и проведение в отношении призывников мероприятий, связанных с призывом на военную службу и направлением их для ее прохождения в научных ротах.

Отбор кандидатов проводится на основании перечня направлений подготовки (специальностей) высшего образования кандидатов в научные роты, утвержденного УНВ РХБ защиты³.

Кандидат должен соответствовать следующим требованиям:

иметь документ государственного образца о высшем образовании, либо являться студентом высшего учебного заведения, либо иметь заверенную образовательной организацией выс-

² «Инструкция по отбору кандидатов в научные роты Вооруженных Сил Российской Федерации» утверждена статс-секретарем – заместителем Министра обороны Российской Федерации 25 апреля 2022 г.

³ Научная рота – Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (<https://varhbx.mil.ru/folder/5983>; дата обращения: 03.10.2022).

шего образования копию зачетной книжки с общим средним баллом успеваемости не ниже 4,0 (по дисциплинам, соответствующим профилю научно-исследовательской деятельности научной роты, не ниже 4,5);

иметь категорию годности к военной службе по состоянию здоровья не ниже Б-4 и уровень нервно-психической устойчивости не ниже «хорошо»⁴.

Отбору в научную роту не подлежат граждане, прошедшие подготовку к военной службе по военно-учетным специальностям в образовательных организациях ДОСААФ России.

Основными критериями при отборе кандидатов являются способность вести самостоятельную научную деятельность в профильных направлениях, а также научный потенциал кандидата, выявленный при индивидуальном собеседовании. Предпочтение, при этом, отдается победителям олимпиад, конкурсов, стипендиатам Президента и Правительства Российской Федерации, участникам научных работ, выполняемых на основе грантов⁵. Средний балл успеваемости отобранных кандидатов, как правило, составляет не менее 4,7.

В целях повышения открытости, демонстрации привлекательности и престижности прохождения военной службы по призыву в научной роте академией специально разработан презентационный материал, характеризующий социально-бытовые условия, условия прохождения научной военной службы и выполнения научных задач, а также перспективы дальнейшего прохождения военной службы по контракту.

Ректорам ведущих вузов страны ежегодно направляются соответствующие информационные материалы о роте для агитации в пользу прохождения службы студентами выпускных курсов. Кроме того, на сайте ВА РХБ защиты размещены требования к кандидатам в научную роту, список необходимых документов для участия в конкурсном отборе и перечень направлений подготовки (специальностей) высшего образования будущих кандидатов.

Организация боевой подготовки операторов научной роты. С молодым пополнением научной роты после очередного призыва осваивается программа боевой подготовки военнослужащих ВС РФ, впервые поступивших (призванных) на военную службу. Освоение программы завершается проведением стрельб из штатного оружия, а также выполнением соответствующих упражнений по уничтожению живой силы, тан-



Рисунок 1 – Проведение занятия с пополнением научной роты по теме: «Уничтожение живой силы, танков и других бронированных машин противника ручными гранатами» (фотография авторов)

ков и других бронированных машин противника ручными гранатами (рисунок 1).

По завершению курсов начальной военной и общевойсковой подготовки молодое пополнение роты приводится к Военной присяге.

Организация научной деятельности операторов научной роты. Приказом начальника ВА РХБ защиты военнослужащие научной роты распределяются по научно-практическим группам. Количество научно-практических групп периодически увеличивается с учетом задач, возникающих перед войсками РХБ защиты.

В рамках выполняемых и планируемых к выполнению научно-исследовательских работ (НИР), а также направлений деятельности научных школ ВА РХБ защиты за каждым военнослужащим закреплен научный руководитель из числа научно-педагогических работников, имеющих ученую степень и ученое звание, а также практический опыт выполнения научных исследований.

Для проведения НИР по направлениям деятельности научной роты для каждого военнослужащего разрабатываются индивидуальный план научной работы оператора (в котором отражаются направление научной работы, решаемые задачи и др.), планы работы на весь период прохождения военной службы и на каждый месяц.

По истечении срока прохождения военной службы операторов проводятся заседания кафедр по результатам выполняемых НИР (кон-

⁴ Научная рота – Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (<https://varhbz.mil.ru/folder/5983>; дата обращения: 03.10.2022).

⁵ Поступающим в Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (https://kvvu.mil.ru/Postupayuschim/Pravila_postupleniya; дата обращения: 04.10.2022).

кретных научно-прикладных задач) с целью их завершения или дальнейшего продолжения. По итогам работы оператора составляется отчет за период прохождения им военной службы, утверждаемый научным руководителем.

После окончания службы военнослужащим в соответствии с приказом Министра обороны РФ предоставляется возможность:

заключить контракт о прохождении военной службы с присвоением воинского звания «лейтенант»;

остаться в качестве научного работника в вузах и научно-исследовательских организациях Министерства обороны Российской Федерации с последующей возможностью защиты диссертации и присвоением ученого звания кандидат наук;

трудоустроиться в научных организациях, входящих в состав военно-промышленного комплекса Российской Федерации.

Условия проживания. Военнослужащие научной роты размещаются на одном этаже общежития по 3–4 человека в комнате. В общежитии созданы все необходимые условия для повседневной жизни и быта.

Досуг операторов научной роты. Все они периодически посещают музеи и выставки, проходящие в городских и областных библиотеках, кинотеатры и филармонию, концертно-выставочный центр «Губернский». Операторам созданы надлежащие условия для систематических занятий спортом. В расположении роты оборудована спортивная комната.

Результаты научной деятельности операторов научной роты. С момента образования военнослужащие роты получили 14 патентов, 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработали 352 рационализаторских предложения, опубликовали 378 статей в профильных научных изданиях. Операторы активно принимают участие в выставках, конференциях, форумах, проводимых как на уровне академии, так и Министерства обороны Российской Федерации.

Участие научной роты в борьбе с коронавирусной инфекцией COVID-19. По указаниям Оперативного штаба при губернаторе Костромской области в 2020 г. в целях борьбы с распространением коронавирусной инфекции специалистами ВА РХБ защиты при участии операторов научной роты проводились исследования по созданию и испытанию многообразных средств индивидуальной защиты органов дыхания и кожи («противочумных костюмов»).

На основе результатов этих исследований промышленными предприятиями Костром-

ской области были изготовлены новые многообразные средства индивидуальной защиты, обеспечивающие непрерывную защиту от COVID-19 с возможностью ежедневной дезинфекции (не менее 25 циклов). Костюм «Здоровье» прошел испытания в Федеральной службе по надзору в сфере здравоохранения, а ООО «ППО «ОРБИТА» стало пятым предприятием в России, получившим регистрационное удостоверение на производство соответствующего медицинского изделия.

В результате работники медицинских учреждений Костромской области и других субъектов РФ были своевременно обеспечены средствами индивидуальной защиты во время пандемии. При создании названных средств защиты были использованы ткани исключительно российского производства⁶.

За добросовестное исполнение специальных обязанностей в период введения ограничительных мероприятий на территории Костромской области в условиях режима повышенной готовности с целью недопущения завоза и распространения коронавирусной инфекции операторы научной роты отмечены благодарностью Губернатора Костромской области.

Участие научной роты на Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ». Научная рота ежегодно представляет свои разработки на Международном военно-техническом форуме (МВТФ) «АРМИЯ». По итогам МВТФ «АРМИЯ-2021» за активное участие в демонстрации научных достижений, подготовке и проведении деловой программы рота награждена несколькими грамотами и дипломами.

По итогам конкурса по отбору инновационных работ и экспонатов научных рот ВС РФ и ВИТ «ЭРА» на форуме «АРМИЯ-2022» конкурсная комиссия Минобороны России установила, что из 57 заявленных инновационных проектов соответствуют предъявленным требованиям 46.

Эксперты Минобороны России определили научную роту войск РХБ защиты ВС РФ победителем конкурса в номинации «За достижения в научно-исследовательской деятельности научных рот» за инновационную разработку «Комплексные соединения биометаллов с пантотеновой кислотой и аминокислотами, проявляющие ранозаживляющие и радиозащитное действие», которая может быть эффективно применена в качестве противолучевых и ранозаживляющих средств в профилактических и терапевтических целях, включая медицинскую практику военного и антитеррористического характера в чрезвычайных условиях радиаци-

⁶ Аккузин К.Н., Чугунов Е.А. Еще один орден на Боевом знамени: Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко награждена орденом Кутузова // Вестник войск РХБ защиты. 2022. Т. 6. № 2. С. 103–108.

онных инцидентов. В настоящее время продолжается работа по созданию инновационных проектов, лучшие из которых будут продемонстрированы на МВТФ «АРМИЯ-2023».

Заключение

Для большинства операторов значимым преимуществом службы в научной роте является оптимальное решение задачи прохождения службы по призыву. Новый формат службы по призыву создает для молодых людей возможности приумножить свой культурный и интеллектуальный капитал, приобрести опыт научной работы, совершенствовать профессиональные умения, а главное – сделать обоснованный выбор профессии. Как результат, каждый второй оператор желает продолжить военную службу на офицерских должностях.

Многие из них считают, что служба по призыву в научной роте – это особый вид службы, «перспективный кадровый механизм».

И это вполне справедливое суждение. Служба в научной роте эффективно способствует восстановлению престижа и привлекательности военной службы по призыву для современной молодежи. Этот факт уже зафиксирован социологами, как и факт, свидетельствующий о том, что поддержка Российской армии со стороны общества сегодня самая высокая за последние 10 лет. Наличие научных рот и их презентация в средствах массовой информации активно формируют образ ВС РФ как наукоемкой, высокотехнологичной сферы деятельности, в которой созданы все условия для самореализации и профессионального роста молодых людей.

Вклад авторов / Authors Contributions

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Об авторах

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» Министерства обороны Российской Федерации, 156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16.

Чугунов Евгений Анатольевич. Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ВА РХБ защиты, канд. истор. наук, доцент.

Аккузин Константин Николаевич. Начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров ВА РХБ защиты, канд. воен. наук, доцент.

Никифоров Роман Владимирович. Старший научный сотрудник ВА РХБ защиты.

Горохов Илья Сергеевич. Младший научный сотрудник ВА РХБ защиты.

Контактная информация для всех авторов: varhbz@mil.ru

Контактное лицо: Аккузин Константин Николаевич; varhbz@mil.ru

На территории Шиханского гарнизона открыли Парк семьи «Фруктовый сад»



По инициативе женсовета войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации старт акции создания «Парков семьи» состоялся 26 апреля 2022 г. в нижнем микрорайоне города Вольск-18 Саратовской области. Акция приурочена к 9 мая – празднику Великой Победы Советского народа в Великой Отечественной войне. Затем подобный сад был высажен на территории Военной академии РХБ защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко в честь 90-летия образования вуза. В День семьи, любви и верности, приуроченный к православному дню памяти святых князя Петра и его жены Февронии (8 июля), зеленый проект воплотили в жизнь в 282-ом Трансильванском Краснознаменном Ордена Александра Невского учебном центре войск РХБ защиты Минобороны России.

Ко Дню образования войск РХБ защиты ВС РФ (13 ноября) в Шиханском гарнизоне состоялось торжественное открытие Парка семьи. «Фруктовый сад» был заложен в честь военнослужащих, принимающих участие в специальной военной операции по защите мирных жителей Донбасса и их семей. У каждого деревца своя пара, что стало уже традицией женсоветов войск РХБ защиты.

«Проект создания «Парков семьи» направлен на укрепление института семьи и традиционных семейных ценностей как фактора национальной безопасности страны. Яблоневый сад будет расти и напоминать всем нам о героизме наших защитников Отечества, а также о семьях военнослужащих», отметила председатель женского совета войск РХБ защиты Светлана Кириллова. В посадке сада участвовали командование и личный состав воинских частей гарнизона, члены семей военнослужащих, принимающих непосредственное участие в специальной военной операции. Площадь сада составила 600 квадратных метров с оборудованными на его территории летними беседками, декоративным деревянным забором, тротуарными дорожками с подсветкой и установленными лавочками. Это самый большой парк, который на сегодняшний день существует в войсках РХБ защиты.

В ходе мероприятия состоялась торжественная церемония посвящения школьников



Сестры Ирина и Наталья Нужины на концерте, посвященном открытию Парка семьи в Шиханском гарнизоне

в ряды Всероссийского детско-юношеского военно-патриотического общественного движения «Юнармия». Воинам, участвующим в спецоперации на Украине, юнармейцы написали письма с пожеланиями вернуться с победой, живыми и здоровыми.

В преддверии мероприятия состоялся детский открытый турнир по мини-футболу на базе спортивного комплекса гарнизона, который является частью современной спортивной инфраструктуры городка.

В гарнизонном Доме офицеров прошло чествование особо отличившихся военнослужащих и гражданского персонала воинских частей и организаций Шиханского гарнизона.

Завершилось мероприятие исполнением членами женсовета войск РХБ защиты, авторами и победителями международных музыкальных конкурсов, участниками благотворительных концертных программ для военнослужащих МО РФ Ирины и Натальи Нужиных гимна женсоветов войск РХБ защиты.

Данный проект охватит все гарнизоны войск РХБ защиты с целью благоустройства военных городков и увековечивания памяти военнослужащих, принимающих участие в специальной военной операции и их семей.

*Младший научный сотрудник отдела
27 НЦ МО РФ Н.П. Соляник*

К 85-летию доцента Евгении Петровны Поздняковой



31 августа 2022 г. исполнилось 85 лет удивительному и разностороннему человеку, талантливому руководителю и педагогу доценту Евгении Петровне Поздняковой, давшей математические знания и привившей любовь к математике сотням военных химиков.

Евгения Петровна родилась в селе Преображенка Пугачевского района Саратовской области. Воспитывалась в семье служащего, была четвертым ребенком. В 1951 г. она поступила в педагогическое училище г. Пугачева, в котором показала отличные результаты по успеваемости, за что была отмечена на протяжении всего обучения повышенной стипендией.

Большую роль в судьбе Евгении Петровны сыграли учителя, окончившие гимназии в дореволюционной России. Своим подходом к делу они считали не только необходимым донести до учеников предмет обучения, но и раскрывать в личностях разные таланты. Так, преподаватель рисования Александр Иванович Мешков, выпускник Московской академии художеств, участник Великой Отечественной войны, на своих уроках открыл у Евгении Петровны талант художника. Правильно говорят, что талантливый человек талантлив во всем!

В 1955 г. Евгения Петровна поступила в Саратовский педагогический институт им. К.А. Федина. По совокупности заслуг в учебе, спорте и общественной работе института в 1957 году она была удостоена Сталинской стипендии, которую получала на протяжении 1958–1959 и 1959–1960 учебных годов. После окончания института в 1960 г. в числе 120 выпускников получила направление в Алтайский край на должность учителя математики в одну из средних школ г. Барнаула. В 1961 г., из-за большого желания продолжить обучение, Евгения Петровна вернулась в родной г. Саратов, где в течение года проработала школьным учителем математики. В 1962 г. устроилась на работу в Экономический институт ассистентом по дисциплине математика и через два года



Доцент Евгения Петровна Позднякова

поступила в аспирантуру пединститута. Во время учебы в аспирантуре летом 1968 г. устроилась временно на работу в Саратовское военное химическое училище, которое на тот момент было средним учебным заведением. С этого момента и на протяжении 40 лет вся жизнь Евгении Петровны была непрерывно связана с химическими войсками. В сентябре 1969 г., после образования Саратовского высшего военного командного училища химической защиты, перешла на постоянную работу на вновь образованную кафедру «Высшей математики».

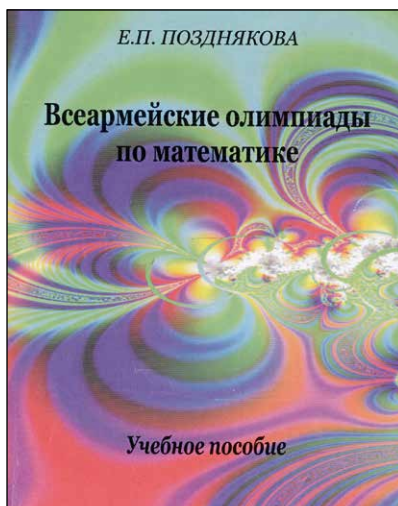
В 32 года Евгения Петровна становится заведующей кафедрой, которую она возглавляла в периоды 1969–1976 гг. и 1990–1996 гг. В 1996 г. кафедра была реорганизована в кафедру «Автоматизированных систем управления (математики)». Евгению Петровну назначили на должность доцента кафедры, и она возглавила предметно-методическую комиссию по математике. Опираясь на свой богатый опыт руководства кафедрой, она внесла неоценимый вклад в становление новой кафедры.

Колоссальный багаж знаний позволял ей на высоком профессиональном уровне проводить занятия, которые отличались высокой организацией учебной деятельности курсантов. Создаваемая на занятиях атмосфера доброжелательности, педагогической требовательности, индивидуального подхода к каждому курсанту и взаимопомощи способствовала формированию у них позитивной мотивации к прочному освоению учебного материала.

Евгения Петровна использовала в образовательном процессе активные и интерактивные формы проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой для формирования и развития общих и профессиональных компетенций обучающихся, систематически проводила дополнительные занятия и консультации, уделяя особое внимание подготовке курсантов к разработке и защите курсовых работ по математической статистике.



Прием экзаменов, 1973 год



Учебное пособие «Всеармейские олимпиады по математике» (Саратов: 2007), подготовленное Е.П. Поздняковой



Увлечение доцента Е.П. Поздняковой – пейзажная живопись. На выставке работ 1997 г.

На разных этапах своей педагогической деятельности в Саратовском высшем военном командном училище химической защиты, а в дальнейшем и в Саратовском военном институте РХБ защиты учениками Е.П. Поздняковой были такие военачальники, как генерал-полковник В.П. Капашин, генерал-лейтенант И.Н. Торгун, генерал-майоры В.Б. Кондратьев, Е.Н. Король, М.И. Белов, Н.Т. Волков, Е.В. Курчинский и др.

Евгения Петровна стояла у истоков организации подготовки курсантов к участию во Всеармейских олимпиадах по математике. Ей удалось разработать собственную уникальную методику подготовки, которая в дальнейшем успешно реализовалась в победы на Всеармейских олимпиадах по математике в 2004, 2006, 2008, 2009 гг. и второе место в 2007 г.

Результатом многолетней плодотворной работы доцента Е.П. Поздняковой по подготовке к Всеармейским олимпиадам по математике стало издание уникального по своей сути сборника задач «Всеармейские олимпиады по математике», который был внедрен и используется в системе образования военных учебных заведений Министерства обороны Российской Федерации.

Начиная с 2010 г., после выхода на пенсию, Е.П. Позднякова продолжила свою професси-

ональную деятельность, выступая в качестве эксперта комиссии по формированию заданий для Всеармейских олимпиад по математике, неоднократно приглашалась на них в качестве почетного гостя.

В настоящее время продолжает заниматься своим любимым делом, проводя консультации преподавателей математики многих военных учебных заведений Министерства обороны Российской Федерации в части подготовки и обучения курсантов.

За большой личный вклад в повышение качества образования, совершенствование методов обучения и воспитания, продуктивное использование новых образовательных технологий неоднократно отмечалась наградами как Министерства образования и науки Российской Федерации, так и Министерства обороны Российской Федерации.

Мы выражаем слова благодарности и низко кланяемся Евгении Петровне за ее неоценимый вклад в дело обучения и воспитания офицеров России!

Коллектив ветеранов Саратовского военного института РХБ защиты, друзья, товарищи, коллеги и ученики сердечно поздравляют Евгению Петровну Позднякову с 85-летием со дня рождения и желают ей крепкого здоровья, успехов и долгих лет жизни!!!

Старков Евгений Геннадьевич (к 65-летию со дня рождения)



26 ноября исполнилось 65 лет генерал-майору в отставке Евгению Геннадьевичу Старкову – начальнику войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации в период 2008–2012 гг., Заслуженному военному специалисту Российской Федерации, кандидату экономических наук, референту начальника войск РХБ защиты ВС РФ, Президенту Союза ветеранов войск, специалистов организаций в области радиационной, химической и биологической защиты, Почетному ветерану Вооруженных Сил Российской Федерации.



Старков Евгений Геннадьевич

Евгений Геннадьевич Старков родился в 1957 г. в городе Костроме. На военной службе с 1975 г. В 1979 г. окончил Костромское высшее военное училище химической защиты. В 1991 г. – Военную академию химической защиты. В 2004 г. – курсы повышения квалификации при Военной академии Генерального Штаба Вооруженных Сил Российской Федерации.

Военную службу проходил на различных должностях – от командира взвода до начальника войск РХБ защиты армии в Московском военном округе, Группе советских войск в Германии, Закавказском и Дальневосточном военных округах. С 1996 г. – в Управлении начальника войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации в должностях: старшего офицера, начальника группы, заместителя начальника и начальника оперативного отдела – заместителя начальника штаба Управления. С 2006 по 2008 г. – начальник штаба – первый заместитель начальника войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации.

Указом Президента Российской Федерации от 9 июня 2008 г. № 915 полковник Евгений Геннадьевич Старков назначен начальником войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации. Под его руководством решались проблемы совершенствования подготовки

войск к выполнению задач по защите войск и населения от оружия массового поражения, повышения боевых возможностей и боевой готовности наших войск, создания и сохранения их оптимальной структуры, модернизации существующих и создания перспективных образцов вооружения и средств РХБ защиты. Совершенствовались способы боевого применения войск при выполнении задач стратегического и регионального сдерживания, оптимизации форм и методов работы командиров и штабов.

За годы службы в войсках РХБ защиты Евгений Геннадьевич внес большой личный вклад в поддержание высокой боеспособности войск, в подготовку руководящих и научно-педагогических кадров, в решение вопросов обеспечения войск РХБ защиты современными образцами вооружения и военной техники. Под его руководством и при непосредственном участии разработан и во многом реализован перспективный план развития войск РХБ защиты, проведен ряд основополагающих мероприятий по реформированию и сохранению войск РХБ защиты, повышению их готовности к выполнению задач по предназначению, сохранению высококвалифицированных офицерских кадров в период реформирования Вооруженных Сил Российской Федерации. Особое внимание Евгений Геннадьевич уделял развитию инфраструктуры военных городков в местах их постоянной дислокации в целях обеспечения современных комфортных условий для военной службы и проживания военнослужащих, в том числе и членов их семей.

После окончания действительной военной службы Евгений Геннадьевич продолжает принимать активное участие в жизни войск РХБ защиты, их строительстве и развитии. Являясь референтом Начальника войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации и Президентом Союза ветеранов войск, специалистов и организаций в области радиационной,

химической и биологической безопасности (Союза ветеранов войск РХБЗ), проводит большую работу по объединению ветеранов для плодотворной общественной деятельности, по обобщению их интеллектуального научного и практического опыта для повышения боевого потенциала войск РХБ защиты, сохранения и развития традиций армии.

При этом Евгений Геннадьевич является один из инициаторов создания базовой для войск РХБЗ организации ветеранов, созданной впервые за всю историю существования войск, как равноправное юридическое лицо среди других общественных организаций ветеранов войны и военной службы Страны со своим финансовым счетом, реестром и сайтом с книгой памяти и возможностью размещения электронной версии основного научно-практического журнала войск «Вестник войск РХБЗ».

На базе кропотливой изыскательской работы в Центральном архиве Минобороны России, организованной Евгением Геннадьевичем собран обширный материал и издана книга «100 лет войскам радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных сил Российской Федерации» (под редакцией Героя труда Российской Федерации Начальника войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации И.А. Кириллова и Президента Союза ветеранов войск РХБЗ генерал-майора Е.Г. Старкова). Им завершена документированная история создания военно - химических учебных заведений в приказах и директивах. Документ долгожданный для всех поколений офицеров войск РХБЗ.

И наконец, под руководством генерал-майора Старкова Е.Г. проведена огромная подготовительная работа, завершившаяся в июне 2021 г. благословением Патриарха Московского и всея Руси Кирилла войскам РХБЗ небесного покровителя в лице Святого благоверного Великого князя Андрея Боголюбского – воина и собирателя русских земель, основателя первого российского централизованного государства.

Волею Патриарха на средства РПЦ в Москве на Волжском бульваре был построен и введен в действие Храм имени святого князя

Андрея Боголюбского, который стал для войск РХБЗ, практически, войсковым храмом.

В ноябре 2022 г. по итогам своей деятельности в ветеранском движении страны Союз ветеранов войск РХБЗ награжден почетной грамотой за активное взаимодействие с Русской Православной Церковью в решении задач патриотического воспитания военнослужащих от имени Главного военного инспектора Министерства обороны РФ, члена Российского организационного комитета «ПОБЕДА», Председателя Совета Общероссийской организации ветеранов Вооруженных Сил РФ генерала армии Ермакова Виктора Федоровича.

Высокая оценка работы Союза ветеранов войск РХБЗ и ее руководителя приурочена к юбилейному 65-летию почетного ветерана Вооруженных Сил Российской Федерации генерал-майора Старкова Евгения Геннадьевича.

Уважаемый Евгений Геннадьевич, с Юбилеем Вас, с Днем рождения!

Мы гордимся Вами. Желаем Вам крепкого здоровья, счастья, благополучия. Выражаем слова глубокого уважения и признательности за Ваш плодотворный ратный труд, успешное решение задач, стоящих перед войсками РХБ защиты и Союзом ветеранов.

Начальник войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации

Герой труда Российской Федерации, генерал-лейтенант Кириллов Игорь Анатольевич

Председатель Наблюдательного совета союза ветеранов войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации

генерал-полковник Петров Станислав Вениаминович

Председатель Правления Союза ветеранов войск РХБ защиты Вооруженных Сил Российской Федерации

генерал-лейтенант Батырев Василий Васильевич

Ветераны Войск РХБ защиты ВС РФ

Памяти Тимерьяна Габдрахмановича Абдуллина (1926–2022 гг.)



Тимерьян Габдрахманович родился 16 декабря 1926 г. в селе Туктагул Кандринского района Башкирской АССР девятым ребенком в бедной крестьянской семье. В 1943 г., не окончив десятилетки, в возрасте 17 лет был призван в армию и направлен на курсы снайперов. На фронте с мая 1944 г., участвовал в боевых действиях с фашистской Германией в составе 4-го Украинского, 1-го и 2-го Прибалтийских фронтов. Был тяжело ранен. В ходе Мемельской наступательной операции Красной Армии летом-осенью 1944 г. рядовой Т.Г. Абдуллин в составе 91-й стрелковой дивизии принимал участие в знаменитом пешем марше, когда наши войска скрытно, в полной амуниции, не выходя на шоссе, за 10 суток преодолели более 200 км по болотистой местности, сходу вступили в бой и заняли берег Балтийского моря, отрезав от Германии группу армий «Север». За участие в этой операции Т.Г. Абдуллин был награжден медалью «За отвагу». Победу встретил 9 мая 1945 г. в Берлине.

В 1946 г., после демобилизации, завершил образование в средней школе и поступил в Военно-медицинскую академию им. С.М. Кирова, которую окончил с отличием в 1953 г., а в 1954 г. – факультет заочного обучения Военного института иностранных языков.

После окончания академии Т.Г. Абдуллин был направлен в г. Киров в НИИ микробиологии МО СССР на должность переводчика-референта научно-технической библиотеки (1953–1954 гг.). Затем прошел все ступени служебной лестницы – от младшего научного сотрудника (1954) до начальника института (1984–1991 гг.). В общей сложности институту отдано 38 лет жизни.

Основным направлением научной деятельности Т.Г. Абдуллина в НИИ микробиологии МО СССР было изучение биологии и генетики возбудителя чумы и других патогенных



*Доктор медицинских наук, профессор,
генерал-майор медицинской службы
в отставке Тимерьян Габдрахманович
Абдуллин*

бактерий, и разработка эффективных способов профилактики и лечения особо опасных инфекционных заболеваний бактериальной природы.

Под руководством Т.Г. Абдуллина сотрудниками института экспериментально доказано наличие собственных плазмид у чумного микроба и детерминирование ими важнейшего свойства возбудителя – способности вызывать инфекционное заболевание; по результатам этой работы было официально зарегистрировано научное открытие (диплом на открытие СССР № 001 «Плазма», приоритет от 27 декабря 1977 г.).

Также под руководством и при непосредственном творческом участии Т.Г. Абдуллина разработаны схемы анти-

биотикопрфилактики и терапии ряда особо опасных инфекций, созданы новые эффективные вакцинные препараты. За выдающийся личный вклад в проведенные исследования в 1982 г. Т.Г. Абдуллин был удостоен Государственной премии СССР.

За время службы в институте Т.Г. Абдулиным лично и в соавторстве выполнено более 100 научных работ и зарегистрировано 28 изобретений. В 1961 г. он защитил кандидатскую, а в 1980 г. – докторскую диссертации, в 1984 г. утвержден в ученом звании профессор. Под его руководством выполнено 18 кандидатских диссертаций. Военно-научная школа, основателем которой являлся Т.Г. Абдуллин, продолжает свою деятельность, развивается и успешно решает актуальные научные задачи в области биологической защиты.

В период службы Т.Г. Абдуллина в должности начальника НИИ микробиологии МО СССР им была проделана огромная работа по курированию строительства новой лабораторной базы института (объект Киров-200) и освоению её первой очереди, приняты в эксплуатацию лабораторные корпуса № 8 и 13 в Кирове,

сдан жилой дом № 62 по улице Московской.

Правительство страны высоко оценило вклад Т.Г. Абдуллина в укрепление обороноспособности страны. Он награжден орденами Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, Отечественной войны, «За службу Родине в ВС СССР», медалями «За отвагу», «За боевые заслуги», «За победу над Германией» и другими наградами.

После увольнения в 1991 г. в запас и вплоть до мая 2022 г. Тимерьян Габдрахманович продолжал трудовую деятельность в качестве профессора и заведующего кафедрой гистологии Кировской государственной медицинской академии.

Будучи уволенным из рядов Вооруженных Сил, Т.Г. Абдуллин не разрывал творческих связей с родным институтом. Он активно участвовал во всех военно-патриотических мероприятиях, рассказывал офицерам, солдатам и сержантам о пройденном боевом пути, воспитывал в них чувство любви и гордости за свою Родину. С молодыми учеными и специалистами Тимерьян Габдрахманович делился опытом организации и проведения научно-исследовательских работ, рассказывал о вкладе военных ученых НИИ микробиологии МО СССР в обеспечение биологической безопасности страны, принимал активное участие в работе



Снайпер Тимерьян Абдуллин

ветеранской организации, в создании экспозиции научно-исторического музея центра.

Как научного руководителя и педагога Тимерьяна Габдрахмановича отличали глубокие знания, опыт, талант экспериментатора. Он требовал доказывать достоверность полученных результатов за лабораторным столом, лично участвовал в экспериментах, подавал в этом отношении пример своим ученикам. Ему были присущи глубокая эрудиция во всех областях знания, высочайший уровень владения иностранными языками, умение безупречно, правильно и красиво пи-

сать научные тексты. Многие ученики Т.Г. Абдуллина стали докторами наук, профессорами, полковниками и генералами.

Как организатор науки Тимерьян Габдрахманович владел секретом, как создавать творческую атмосферу в коллективе, как объединять усилия многих людей, самых разных по своему потенциалу, знаниям и умениям для решения важных государственных задач. При этом он был подлинным военным интеллигентом, мудрым, доброжелательным, мягким человеком, отзывчивым к чужой беде. Таким он и останется в памяти своих учеников, коллег, военнослужащих и гражданского персонала 48 ЦНИИ Минобороны России.

Памяти Кочергина Александра Ивановича (02.08.1941 – 16.07.2021 гг.)



Доктор технических наук, профессор Кочергин Александр Иванович прожил долгую трудовую жизнь, насыщенную активной научной деятельностью в области химической технологии отравляющих веществ (ОВ) на благо обороноспособности страны.

Сын офицера-летчика, фронтовика, серебряный медалист, Александр Иванович стал заниматься научно-исследовательской работой, еще будучи студентом Воронежского технологического института. Получив специальность «Машины и оборудование химических производств», не остался на кафедре, а перераспределился в Вольский филиал Государственного союзного научно-исследовательского института органической химии и технологии (ВФ ГОСНИИОХТ), созданный в 1961 г. в рабочем поселке Шиханы Саратовской области. В Шиханах Александр Иванович проработал 43 года, защитил кандидатскую, а затем и диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук (1992 г.).

За эти годы Александр Иванович прошел большой путь от младшего научного сотрудника до директора НИИ, одного из крупнейших в Советском Союзе, который занимался разработкой средств защиты от новых видов боевых ОВ и технологией их промышленного производства. Десять непростых лет, с 1985 по 1996 гг., Александр Иванович руководил Вольским филиалом ГОСНИИОХТ, затем ставшим самостоятельным учреждением – Государственным институтом технологии органического синтеза (ГИТОС).

В 1994–1995 гг. Александр Иванович работал в составе делегации в г. Гаага на сессии Организации по запрещению химического оружия. Обсуждались текущие вопросы вы-



Кочергин Александр Иванович

полнения Конвенции о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении. На такие сессии приглашались крупные специалисты по технологии производства токсических химикатов, в числе которых был и Александр Иванович.

В 2006 г. Александр Иванович был приглашен в Военную академию радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко на преподавательскую работу на должность профессора кафедры. Кроме этого, Александр Ивано-

вич являлся заместителем председателя диссертационного совета, членом ученого совета, членом специального экспертного совета Высшей аттестационной комиссии (ВАК) по оборонным проблемам. Под его руководством в академии защищены три кандидатских и одна докторская диссертации.

В 2015 г. за отличия в выполнении трудовых обязанностей, продолжительную и безупречную работу профессор Кочергин был награжден медалью «За трудовую доблесть».

Таким Александр Иванович и остался в памяти знавших его людей, коллег и учеников – энергичным и трудолюбивым, с активной жизненной позицией.

Сотрудники 13-й кафедры и 8-й научно-исследовательской лаборатории федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» Министерства обороны Российской Федерации (г. Кострома)

Указатель авторов и статей журнала за 2022 год

| Название | Номер журнала | Номера страниц |
|--|------------------|-------------------|
| Редакционная статья | | |
| Емельянов И.М. Военной академии радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко – 90 лет! EDN: NJATUQ | № 1 | 3–11 |
| Аккузин К.Н., Чугунов Е.А. Еще один орден на Боевом знамени: Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко награждена орденом Кутузова. EDN: RIZRVF | № 2 | 103–108 |
| Кириллов И.А. Об итогах Консультативного совещания государств-участников Конвенции о запрещении разработки, производства и накопления запасов бактериологического (биологического) и токсинного оружия и об их уничтожении по вопросу соблюдения США и Украиной обязательств по Статье I и Статье IV Конвенции. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-203-212 . EDN: DCYXIM | № 3 | 203–212 |
| Кириллов И.А. Мир вступил в эпоху синтетического биологического оружия. EDN: ATIXBO | № 4 | 303 |
| Проблемы соблюдения Конвенций о запрещении химического и биологического оружия | | |
| Капашин В.П., Мандыч В.Г., Исаев И.Н., Коваленко И.В., Верига В.Л. Новые технологии уничтожения химического оружия – залог успешного завершения процесса химического разоружения. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-213-228 . EDN: LYUGUM | № 3 | 213–228 |
| Лакома Ян. Наночастицы как потенциальные агенты химического и биологического оружия. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-304-319 . EDN: CGEFOD | № 4 | 304–319 |
| Григорьев А.М., Фатеев В.Н. Современные психоактивные вещества и их обнаружение в биомедицинских пробах. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-320-341 . EDN: EUKKMS | № 4 | 320–341 |
| История и современность обеспечения РХБ безопасности | | |
| Аккузин К.Н., Чугунов Е.А., Шило Н.И. Международная военно-историческая конференция «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко: этапы большого пути (к 90-летию со дня основания)». EDN: FTVXPU | № 2 | 109–113 |
| Капашин В.П., Мандыч В.Г., Самарин С.И., Исаев И.Н., Коваленко И.В., Верига В.Л. Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия – 30 лет со дня образования. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-6-2-114-122 . EDN: NEJIBI | № 2 | 114–122 |
| Химическая безопасность и защита от химического терроризма | | |
| Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Ковтун В.А., Гореленков В.К., Фролов Г.А., Лягин И.В., Степанов Н.А., Ефременко Е.Н. Противохимические свойства модульного защитного материала. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-6-1-12-27 . EDN: RGJUUV | № 1 | 12–27 |
| Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Ковтун В.А., Гореленков В.К., Фролов Г.А., Лягин И.В., Степанов Н.А., Ефременко Е.Н. Бактерицидные свойства модульных защитных материалов. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-123-136 . EDN: OMBIWN | № 2 | 123–136 |
| Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Ковтун В.А., Гореленков В.К., Фролов Г.А., Лягин И.В., Степанов Н.А., Ефременко Е.Н. Модульные защитные материалы, нейтрализующие токсины (фосфорорганические соединения и микотоксины) и проявляющие биоцидность к клеткам грамположительных и грамотрицательных бактерий. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-229-242 . EDN: HQPBUU | № 3 | 229–242 |
| Ефременко Е.Н., Асланлы А.Г., Лягин И.В. Новые ферментные мишени для фосфорорганических соединений https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-342-354 . EDN: DMKJOE | № 4 | 342–354 |
| Биологическая безопасность и защита от биологических угроз | | |
| Лакома Ян. Военно-биологические лаборатории США в государствах бывшего СССР. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-28-43 . EDN: CKPONL | № 1 | 28–43 |
| Сизикова Т.Е., Чухраля О.В., Лебедев В.Н., Борисевич С.В. Вариант омикрон вируса SARS-CoV-2: способность вызывать заболевание у лиц, имеющих иммунитет против COVID-19, сформированный в результате вакцинации или ранее перенесенного заболевания. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-44-55 . EDN: JFXEEB | № 1 | 44–55 |
| Петров А.А., Сизикова Т.Е., Карулина Н.В., Чухраля О.В., Павельев Д.И., Сайфулина Н.А., Сапкулов А.В., Лебедев В.Н., Кутаев Д.А., Борисевич С.В. Факторы, способствующие получению ложноположительных результатов при проведении диагностики COVID-19 методом обратной транскрипции-полимеразной цепной реакции в реальном времени. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-56-65 . EDN: JFXFWR | № 1 | 56–65 |
| Каплин В.С. Применение птичьих желточных антител для лечения поражений, вызванных агентами биологического оружия и возбудителями особо опасных инфекций. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-137-151 . EDN: VHUOBI | № 2 | 137–151 |
| Супотницкий М.В. Оспа обезьян как малоизученная биологическая угроза для России. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-152-177 . EDN: GUKXJO | № 4 | 339–352 |
| Печенкин Д.В., Горшков А.С., Саблина М.А., Еремкин А.В., Ипатов С.С., Куклина Г.В. Ригин и абрин как вероятные агенты биотеррора. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-243-257 . EDN: RJDLOX | № 3 | 243–257 |
| Филонов В.В., Щеренко В.В., Попов Ю.Е., Терещатов В.Э. Биологические лаборатории в Кавказском регионе как источники угроз национальной безопасности России. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-258-270 . EDN: PUJKVP | № 3 | 258–270 |
| Вооружение войск РХБ защиты и средства РХБ защиты | | |
| Кузнецов В.В., Беляков П.Е., Шаров С.А., Никонов В.С. Высокопроизводительные способы специальной обработки объектов вооружения, военной и специальной техники. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-271-281 . EDN: ODT SIN | № 3 | 271–281 |

| | | |
|--|-----|---------|
| Иноземцев В.А., Ефимов И.Н., Позвонков А.А., Самородов А.С., Пономарев В.Н., Колбинев С.С. Применения современных технических средств химической разведки и контроля для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-355-364 . EDN: DVOLJH | № 4 | 355–364 |
| Морозов А.С., Лакомов В.П., Носков А.А. Опыт использования модульных и носимых технических средств дезинфекции при ликвидации чрезвычайных ситуаций https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-365-371 . EDN: GDTHDR | № 4 | 365–371 |
| Химическое и биологическое оружие в войнах и конфликтах | | |
| Супотницкий М.В. Химическое оружие в ирано-иракской войне 1980–1988 годов. 6. Накопленный опыт лечения поражений отравляющими веществами нервно-паралитического действия. https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-1-65-8 . EDN: RSZXVG | № 1 | 65–82 |
| Повседневная деятельность войск РХБ защиты | | |
| Чугунов Е.А., Аккузин К.Н., Никифоров Р.В., Горохов И.С. Научная рота войск радиационной, химической и биологической защиты https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-386-390 . EDN: HCALSE | № 4 | 386–390 |
| Лекции по ключевым вопросам РХБ безопасности | | |
| Козловский В.В., Уракчинцев А.В., Гусев О.В. Особенности устройства, маркировки и кодировки химических боеприпасов и боевых приборов США и стран НАТО (лекция). https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-178-194 EDN: GFTLUY | № 2 | 178–194 |
| Васильковский Э.В., Дикун А.В., Васюкевич И.Г. Источники ионизирующих излучений, применяемые в современных и перспективных приборах РХБ разведки (лекция). https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-282-294 . EDN: QZBTAU | № 3 | 282–294 |
| Аккузин К.Н., Макеев Е.С. Анализ состояния развития и применения беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения задач РХБ безопасности (лекция). https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-4-372-385 . EDN: HAVVLU | № 4 | 372–385 |
| Рецензии | | |
| Супотницкий М.В. Хабаровский процесс. Документальные свидетельства: сборник документов. EDN: UFZGHH | № 2 | 195–197 |
| Хроника | | |
| Открытие нового военного городка ФГБУ «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации. EDN: RCCRSI | № 1 | 83 |
| Памяти Николая Андреевича Лошадкина (1932–2005 гг.). EDN: BINJVV | № 1 | 84–85 |
| Холстов Виктор Иванович (к 75-летию со дня рождения). EDN: QTJKQN | № 2 | 198 |
| Памяти Петра Геннадьевича Васильева (1951–2022 гг.). EDN: HOOBSE | № 2 | 199–200 |
| Представители войск РХБ защиты ВС РФ почтили память святого благоверного князя Андрея Боголюбского. EDN: AEKMIV | № 3 | 295 |
| Создание парков семьи с яблоневыми садами в воинских частях и организациях войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации. EDN: PLJHEE | № 3 | 296 |
| Завьялова Наталья Васильевна (к 70-летию со дня рождения). EDN: VJHJLQ | № 3 | 297–298 |
| Ушаков Виктор Степанович (к 70-летию со дня рождения). EDN: JHNNIP | № 3 | 299 |
| Памяти Грабарева Павла Алексеевича (17.03.1927 – 27.04.2022 гг.). EDN: NUHOLX | № 3 | 300 |
| На территории Шиханского гарнизона открыли Парк семьи «Фруктовый сад». EDN: HEOJUG | № 4 | 391 |
| К 85-летию доцента Евгении Петровны Поздняковой. EDN: HQLKAC | № 4 | 392–393 |
| Старков Евгений Геннадьевич (к 65-летию со дня рождения). EDN: JRCNAJ | № 4 | 394–395 |
| Памяти Тимерьяна Габдрахмановича Абдуллина (1926–2022 гг.). EDN: JZEIVH | № 4 | 396–397 |
| Памяти Кочергина Александра Ивановича (02.08.1941 – 16.07.2021 гг.). EDN: KABFAJ | № 4 | 398 |
| Журнал | | |
| Правила подготовки и направления статей в журнал «Вестник войск РХБ защиты». EDN: JCZUWE | № 1 | 86–95 |
| Порядок рецензирования статей в журнале «Вестник войск РХБ защиты». EDN: SBWMLM | № 1 | 95–97 |
| Этика научных публикаций в журнале «Вестник войск РХБ защиты». EDN: WOADDL | № 1 | 98–100 |

С 2022 г. в дополнении DOI в библиографическом описании мы используем в качестве постоянного идентификатора для научных публикаций LIBRARY Document Number (EDN) – это уникальный код документа, который присваивается всем документам на платформе eLIBRARY.RU. В дополнении к EDN у каждой публикации, загруженной в eLIBRARY.RU, есть QR-код. Мы проставляем его на первой странице статьи. Если публикация имеет оба кода, то между ними устанавливается связь. В ссылках на такой документ мы рекомендуем указывать оба кода. Выйти на статью можно через указание после адреса eLIBRARY.RU шестизначного буквенного обозначения в нижнем регистре без точки в конце, например, <https://elibrary.ru/lyugum>

Наша замечательная Россия

Фумарольное поле вулкана Мутновский, Камчатка



Вулкан Мутновский – действующий щитовой вулкан в южной части полуострова Камчатка. Удален от Петропавловска-Камчатского на 80 км к югу. Абсолютная высота составляет 2322 м над уровнем моря. Недалеко от вулкана действует Мутновская ГеоЭС (мощность 50 МВт). Мутновский – один из самых активных на Камчатке. Дыхание вулкана чувствуется за несколько километров по фумарольным дымам, т.е. по выбрасываемому из его недр большому количеству водяного пара (верхняя фотография). Основным источником пара являются грунтовые воды, разогретые лежащими близко к поверхности слоями магмы и высокотемпературными фумарольными газами. Вулкан Мутновский – одно из мощнейших фумарольных скоплений в мире! На фотографии внизу слева – фумарольная площадка в кратере вулкана. Наличие фумарол украшает местность желтыми конусами. Дело в том, что через трещины на поверхность кратера вырываются газы. В Мутновском их состав преимущественно серный, метановый и углекислый. Вместе с ними из фумарол с ревом идет пар. Попав на поверхность, газы и пар немного остывают, и начинается процесс конденсации. Поэтому фумаролы обрамлены желтыми отложениями, так называемыми серными куполами. Это конденсат серы. На фотографии внизу в центре фумаролы речки Вулканной, протекающей по дну кратера. По сути это раствор серной кислоты. Туда мы спуститься не решились. Впрочем, один из нас уже на обратном пути, на леднике, чуть сам туда не съехал по насту. На фотографии внизу справа – грязевые котлы. Обычно они разноцветные, в зависимости от того, какой минерал присутствует в выходящем газе. Здесь они голубого и серого цвета. Жидкость в котлах интенсивно бурлит. Зрелище впечатляющее, особенно в сочетании с другими процессами, происходящими в кратере. Выходящий под давлением из недр земли газ шипит, кипящие котлы булькают, акустический фон фантастический.

Фотографии М.В. Супотницкого



Сайт журнала



РИНЦ



ISSN 2587-5728

9 772587 572003 >