

Учредитель  
Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей  
и благополучия человека

---

Ежемесячный научно-практический журнал

# ГИГИЕНА И САНИТАРИЯ

---

**GIGIENA I SANITARIYA**  
(Hygiene & Sanitation, Russian Journal)

Основан в 1910 году  
Established in 1910

Том / Volume 105 • 2026

**№ 9**

Журнал входит в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ, «Белый список», уровень 1) и рекомендованный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (ВАК) Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук.

Журнал зарегистрирован в Ульрихском международном каталоге периодики (США).

Журнал представлен в следующих международных индексах цитирования:  
Chemical Abstracts, Scopus, EBSCO, ПИНЦ, Russian Science Citation Index, VINITI RAN Referativnyi Zhurnal.

**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ГИГИЕНЫ ИМЕНИ Ф.Ф. ЭРИСМАНА**

Москва • 2026

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### РАКИТСКИЙ В.Н., главный редактор

доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)

### КУЗЬМИН С.В., заместитель главного редактора

доктор медицинских наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)

### СУХОВА А.В., ответственный секретарь

доктор медицинских наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)

|                                            |                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>АБИЛЕВ С.К.</b>                         | доктор биол. наук, профессор, Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова (Москва, Россия)                                                                                                       |
| <b>АКИМКИН В.Г.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, ФБУН ЦНИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора (Москва, Россия)                                                                                           |
| <b>АЛИКБАЕВА Л.А.</b>                      | доктор мед. наук, профессор, ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова МЗ РФ (Санкт-Петербург, Россия)                                                                                                 |
| <b>БЕРЕЗНЯК И.В.</b>                       | доктор мед. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                |
| <b>БУХТИЯРОВ И.В.</b>                      | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, ФГБНУ НИИ медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова (Москва, Россия)                                                                                   |
| <b>ДОДИНА Н.С.</b><br>(научный редактор)   | кандидат мед. наук, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                         |
| <b>ЖУРАВЛЁВ П.В.</b>                       | доктор мед. наук, ФБУН РостовНИИМП Роспотребнадзора (Ростов-на-Дону, Россия)                                                                                                                   |
| <b>ЗАЙЦЕВА Н.В.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, ФБУН «ФНЦГ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора (Пермь, Россия) |
| <b>ЗВЕРЕВ В.В.</b>                         | академик РАН, доктор биол. наук, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, НИИ вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова (Москва, Россия)                                                                     |
| <b>ИЗМЕРОВА Н.И.</b>                       | доктор мед. наук, профессор, ФГБНУ НИИ медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова (Москва, Россия)                                                                                                 |
| <b>ИЛЮШИНА Н.А.</b>                        | доктор биол. наук, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                          |
| <b>КАПЦОВ В.А.</b><br>(научный редактор)   | доктор мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, ВНИИ гигиены транспорта Роспотребнадзора (Москва, Россия)                                                                                 |
| <b>КУЧМА В.Р.</b><br>(научный редактор)    | доктор мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (Москва, Россия)                                                                           |
| <b>МЕЛЬНИЧЕНКО П.И.</b>                    | доктор мед. наук, профессор (Москва, Россия)                                                                                                                                                   |
| <b>МИКАИЛОВА О.М.</b>                      | кандидат мед. наук, Управление Роспотребнадзора по Московской области, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» МЗ РФ (Москва, Россия)                                                       |
| <b>ОНИЩЕНКО Г.Г.</b>                       | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, заслуженный врач РФ, зам. президента Российской академии образования (Москва, Россия)                                                               |
| <b>ПАЛЬЦЕВ Ю.П.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, ФГБНУ НИИ медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова (Москва, Россия)                                                                                             |
| <b>ПОПОВА А.Ю.</b>                         | доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ, Роспотребнадзор, ФГБОУ ВО РМАНПО МЗ РФ (Москва, Россия)                                                                                      |
| <b>РАХМАНИН Ю.А.</b>                       | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России (Москва, Россия)                                                                               |
| <b>РЕВАЗОВА Ю.А.</b>                       | доктор биол. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                               |
| <b>РОМАНОВИЧ И.К.</b>                      | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева Роспотребнадзора (Санкт-Петербург, Россия)                                                                             |
| <b>РУМЯНЦЕВА Л.А.</b>                      | доктор биол. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                               |
| <b>РУСАКОВ Н.В.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России (Москва, Россия)                                                                               |
| <b>САВЕЛЬЕВ С.И.</b>                       | доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Липецкой области» (Липецк, Россия)                                                                     |
| <b>СЕРГИЕВ В.П.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, Институт медицинской паразитологии, тропических и трансмиссивных заболеваний им. Е.И. Марциновского Первого МГМУ им. И.М. Сеченова (Москва, Россия) |
| <b>СИНЦЫКА Т.А.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                |
| <b>СИНЦЫНА О.О.</b><br>(научный редактор)  | доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                |
| <b>СКУПНЕВСКИЙ С.В.</b>                    | доктор биол. наук, Институт биомедицинских исследований ВНИЦ РАН и Правительства РСО-А (г. Владикавказ, Россия)                                                                                |
| <b>СТЁПКИН Ю.И.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России (Воронеж, Россия)               |
| <b>ТРУХИНА Г.М.</b>                        | доктор мед. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                |
| <b>ТСАТСАКИС А.М.</b>                      | доктор мед. наук, профессор, иностранный член РАН, Критский университет (г. Ираклион, о. Крит, Греция)                                                                                         |
| <b>УШАКОВ И.Б.</b>                         | доктор мед. наук, профессор, академик РАН, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна (Москва, Россия)                                                                                                   |
| <b>ФЁДОРОВА Н.Е.</b><br>(научный редактор) | доктор мед. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                |
| <b>ХОТИМЧЕНКО С.А.</b>                     | доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, Институт профессионального образования ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова (Москва, Россия)                                                    |
| <b>ЧУЙКОВ Ю.С.</b>                         | доктор биол. наук, профессор, Астраханский государственный университет (Астрахань, Россия)                                                                                                     |
| <b>ЧХВИРКИЯ Е.Г.</b><br>(научный редактор) | доктор мед. наук, профессор, ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (г. Мытищи Московской обл., Россия)                                                                                |
| <b>ШЕВЕЛЁВА С.А.</b>                       | доктор мед. наук, ФГБНУ «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Россия)                                                                                                                         |
| <b>ШЕСТОПАЛОВ Н.В.</b>                     | доктор мед. наук, профессор, РМАНПО (Москва, Россия)                                                                                                                                           |

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

|                        |                                                                                                                         |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>АВЕСИЯН Л.</b>      | доктор мед. наук, профессор (Ереван, Армения)                                                                           |
| <b>БАРДОВ В.Г.</b>     | доктор мед. наук, профессор, член-корр. НАМН Украины (Киев, Украина)                                                    |
| <b>БЕРАУШВИЛИ Ц.А.</b> | доктор биол. наук, член-корр. АЭН Грузии (Тбилиси, Грузия)                                                              |
| <b>БРОДИ М.</b>        | PhD, профессор, международный эколог-консультант Федерального агентства США по защите окружающей среды (Вашингтон, США) |
| <b>КАМБУРОВА В.С.</b>  | кандидат мед. наук, доцент (София, Болгария)                                                                            |
| <b>КАМИЛОВА Р.Т.</b>   | доктор мед. наук, профессор (Ташкент, Узбекистан)                                                                       |
| <b>КАСЫМОВ О.Т.</b>    | доктор мед. наук, профессор (Бишкек, Кыргызстан)                                                                        |
| <b>КЕНЕСАРИЕВ У.И.</b> | доктор мед. наук, профессор, академик ЕАЕН и РАЕН (Алматы, Казахстан)                                                   |
| <b>ЛИ ДЖУНХУА</b>      | доктор мед. наук, профессор (провинция Хайнань, Китай)                                                                  |
| <b>ОДИНАЕВ Ф.И.</b>    | доктор мед. наук, профессор, иностранный член РАН (Душанбе, Таджикистан)                                                |
| <b>ОЮУНЫЛТЭЖ Ж.</b>    | доктор мед. наук, профессор, академик МАМН (Улан-Батор, Монголия)                                                       |
| <b>ПОЛОВИНКИН Л.В.</b> | доктор мед. наук, доцент (Минск, Беларусь)                                                                              |
| <b>ТЫМИНСКИЙ В.Г.</b>  | канд. геолого-минералогических наук, доктор философии, профессор, академик ЕАЕН (Ганновер, Германия)                    |

**RAKITSKII V.N., Editor-in-Chief**

MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)

**KUZ'MIN S.V., Deputy Chief Editor**

MD, PhD, DSc, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)

**SUKHOVA A.V., Executive Editor**

MD, PhD, DSc, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)

---

|                                               |                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABILEV S.K.</b>                            | Dr. Sci. Biol, Prof., N.I. Vavilov Institute of General Genetics (Moscow, Russian Federation)                                                                                                                              |
| <b>AKIMKIN V.G.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of the RAS, Central Research Institute of Epidemiology (Moscow, Russian Federation)                                                                                                       |
| <b>ALIKBAEVA L.A.</b>                         | MD, PhD, DSc, Prof., North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov (St. Petersburg, Russian Federation)                                                                                                |
| <b>BEREZNYAK I.V.</b>                         | MD, PhD, DSc, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                         |
| <b>BUKHTIYAROV I.V.</b>                       | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Izmerov Research Institute of Occupational Health (Moscow, Russian Federation)                                                       |
| <b>DODINA N.S.</b><br>(Scientific Editor)     | MD, PhD, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                                     |
| <b>ZHURAVLEV P.V.</b>                         | MD, Ph.D., DSc, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rostov-on-Don (Rostov-on-Don, Russian Federation)                                                                                              |
| <b>ZAYTSEVA N.V.</b>                          | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Managing Public Health Risks (Perm', Russian Federation)       |
| <b>ZVEREV V.V.</b>                            | MD, Ph.D., DSc, Academician of RAS, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Research Institute of Vaccines and Serums named after I.I. Mechnikov (Moscow, Russian Federation)                                 |
| <b>IZMEROVA N.I.</b>                          | MD, PhD, DSc, Prof., Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow (Moscow, Russian Federation)                                                                                                                |
| <b>ILYUSHINA N.A.</b>                         | MD, Ph.D., DSc, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                              |
| <b>KAPTSOV V.A.</b><br>(Scientific Editor)    | MD, PhD, DSc, Prof., Corresponding Member of the RAS, All-Russian Scientific Research Institute of Transport Hygiene (Moscow, Russian Federation)                                                                          |
| <b>KUCHMA V.R.</b><br>(Scientific Editor)     | MD, PhD, DSc, Prof., Corresponding Member of the RAS, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Moscow, Russian Federation)                                                                          |
| <b>MELNICHENKO P.I.</b>                       | MD, PhD, DSc, Prof. (Moscow, Russian Federation)                                                                                                                                                                           |
| <b>MIKAILOVA O.M.</b>                         | MD, PhD, Rospotrebnadzor for the Moscow Region, Moscow State Medical and Dental University (Moscow, Russian Federation)                                                                                                    |
| <b>ONISHCHENKO G.G.</b>                       | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honoured Doctor of the Russian Federation, Russian Academy of Education (Moscow, Russian Federation)                                                                              |
| <b>PALTSEV Yu.P.</b>                          | MD, PhD, DSc, Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Izmerov Research Institute of Occupational Medicine (Moscow, Russian Federation)                                                                         |
| <b>POPOVA A.Yu.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Honored Doctor of the Russian Federation, Rospotrebnadzor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Moscow, Russian Federation)                                                  |
| <b>RAKHMANIN Yu.A.</b>                        | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Center for Strategic Planning (Moscow, Russian Federation)                                                                           |
| <b>REVAZOVA Yu.A.</b>                         | Dr. Sci. Biol, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                        |
| <b>ROMANOVICH I.K.</b>                        | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, St. Petersburg Research Institute of P.V. Ramzaev Radiation Hygiene (St. Petersburg, Russian Federation)                                                                          |
| <b>RUMYANTSEVA L.A.</b>                       | Dr. Sci. Biol, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                        |
| <b>RUSAKOV N.V.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Center for Strategic Planning (Moscow, Russian Federation)                                                                           |
| <b>SAVELEV S.I.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Honoured Doctor of the Russian Federation, Center for Hygiene and Epidemiology in Lipetsk Region (Lipetsk, Russian Federation)                                                                        |
| <b>SERGIEV V.P.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, V.I. Martynovskiy Institute of Medical Parasitology, Tropical and Transmissible Diseases of the I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Moscow, Russian Federation) |
| <b>SINITSKAYA T.A.</b>                        | MD, PhD, DSc, Prof., Corresponding Member of the RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)           |
| <b>SINITSYNA O.O.</b><br>(Scientific Editor)  | MD, PhD, DSc, Prof., Corresponding Member of the RAS, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                        |
| <b>SKUPNEVSKII S.V.</b>                       | Dr. Sci. Biol., Institute for Biomedical Research – branch of the Federal Scientific Center «Vladikavkaz Scientific Center» of the RAS (Vladikavkaz, Russian Federation)                                                   |
| <b>STYOPKIN Yu.I.</b>                         | MD, PhD, DSc, Prof., Honoured Doctor of the Russian Federation, Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh Region (Voronezh, Russian Federation)                                                                  |
| <b>TRUKHINA G.M.</b>                          | MD, PhD, DSc, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                         |
| <b>TSATSAKIS A.M.</b>                         | MD, PhD, DSc, Prof., foreign member of the RAS, Center for Toxicology and Forensic Medicine, University of Crete (Heraklion, Crete, Greece)                                                                                |
| <b>USHAKOV I.B.</b>                           | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of RAS, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center (Moscow, Russian Federation)                                                                                                    |
| <b>FYODOROVA N.E.</b><br>(Scientific Editor)  | MD, PhD, DSc, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                         |
| <b>KHOTIMCHENKO S.A.</b>                      | MD, PhD, DSc, Prof. Corresponding Member of the RAS, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Moscow, Russian Federation)                                                                                      |
| <b>CHUIKOV Yu.S.</b>                          | MD, Ph.D., DSc, Astrakhan State University (Astrakhan, Russian Federation)                                                                                                                                                 |
| <b>CHKHVRKIYA E.G.</b><br>(Scientific Editor) | MD, PhD, DSc, Prof., Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erismann (Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation)                                                                                         |
| <b>SHEVELEVA S.A.</b>                         | MD, PhD, DSc, Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology (Moscow, Russian Federation)                                                                                                                         |
| <b>SHESTOPALOV N.V.</b>                       | MD, PhD, DSc, Prof., Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Moscow, Russian Federation)                                                                                                             |

---

**INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL**

|                          |                                                                                                                                 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AVETISYAN L.</b>      | MD, PhD, DSc, Prof., (Yerevan, Armenia)                                                                                         |
| <b>BARDOV V.G.</b>       | MD, PhD, DSc, Prof., Corresponding Member of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)                |
| <b>BERUASHVILI Ts.A.</b> | Dr.Sci.Biol., Corresponding Member of the Academy of Environmental Sciences of Georgia (Tbilisi, Georgia)                       |
| <b>BRODY M.</b>          | PhD, Prof. (Washington, USA)                                                                                                    |
| <b>KAMBUROVA V.S.</b>    | PhD, Associate Professor (Sofia, Bulgaria)                                                                                      |
| <b>KAMILOVA R.T.</b>     | MD, PhD, DSc, Prof. (Tashkent, Uzbekistan)                                                                                      |
| <b>KASYMOV O.T.</b>      | MD, PhD, DSc, Prof. (Bishkek, Kyrgyzstan)                                                                                       |
| <b>KENESSARIYEV U.I.</b> | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of the EANS and RANS (Almaty, Kazakhstan)                                                      |
| <b>LI JUNHUA</b>         | MD, PhD, DSc, Prof. (Hunan, China)                                                                                              |
| <b>ODINAEV F.I.</b>      | MD, PhD, DSc, Prof., Foreign Member of the RAS (Dushanbe, Tajikistan)                                                           |
| <b>OYUNBILEG Zh.</b>     | MD, PhD, DSc, Prof., Academician of Mongolian Academy of Medical Sciences (Ulaanbaatar, Mongolia)                               |
| <b>POLOVINKIN L.V.</b>   | MD, PhD, DSc, Associate Professor (Minsk, Belarus)                                                                              |
| <b>TYMINSKIY V.G.</b>    | PhD Geological and Mineralogical Sciences, PhD., Prof., Academician of European Academy of Natural Sciences (Hannover, Germany) |

**Адрес редакции**
 141014, Московская область,  
г. Мытищи, улица Семашко, д. 2
**Заведующая редакцией**
 Серебренникова Светлана Леонидовна  
E-mail: gigan@list.ru
**Сайт журнала:**<https://www.rjhas.ru><https://www.гигиенаисанитария.рф>**Электронная версия журнала:**[https://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=7769](https://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=7769)<https://cyberleninka.ru/journal/n/gigiena-i-sanitariya>**Издатель**
 ФБУН «Федеральный научный  
центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана»  
Роспотребнадзора.

 141014, Московская область,  
г. Мытищи, улица Семашко, д. 2

Телефон: +7 495 586 11 44

<https://фнцг.рф>Литературный редактор *Е.С. Нерсесова*Web-редактор *Н.Е. Люблев*Переводчик *Л.Д. Шакина*Корректор *М.В. Козлова*
 Вёрстка, обработка графического  
материала *С.М. Мешкорудникова*

ISSN 0016-9900 (Print).

ISSN 2412-0650 (Online).

Гигиена и санитария. 2026. 105(9).

С. 943–1066.

Сдано в набор 29.09.2026.

Подписано в печать 15.10.2026.

Опубликовано 20.10.2026.

Формат 60 × 90 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 15,5+0,5 цв. вкл. Усл. печ. л. 14,9.

Уч.-изд. л. 8,8.

Тираж 1000 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии

ФБУЗ ФЦГиЭ Роспотребнадзора,

117105, Москва, Варшавское шоссе, д. 19 А

© ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана»

Роспотребнадзора, 2026

**ГИГИЕНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

- Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Нурисламова Т.В., Старчикова М.О., Загороднов С.Ю., Балашов С.Ю.* Гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами при выбросах автономных источников теплоснабжения, использующих различные виды твёрдого топлива. . . . . **948**
- Кушнерова Н.Ф., Рахманин Ю.А., Момот Т.В., Рыжова И.Н., Фоменко С.Е., Спрыгин В.Г.* Этнические различия липидного состава и физиологических характеристик эритроцитов у коренного и пришлого населения северных территорий Российской Федерации. . . . . **956**
- Мельников О.А., Жернов Ю.В., Болахан В.Н., Краевой С.А., Юдин С.М.* Европейский опыт создания национальных систем эпидемиологии сточных вод. Часть 2: Анализ ключевых практик (аналитический обзор). . . . . **965**
- Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Стратан Г.С., Алексеев М.М., Малышева А.Г., Юдин С.М.* Гигиеническая оценка качества водных объектов и систем водоснабжения одного из промышленных городов Московской области (г. Красноармейск). . . . . **975**

**МЕДИЦИНА ТРУДА**

- Шевченко О.И., Лахман О.Л., Сливницына Н.В., Русанова Д.В.* Изменение функциональной активности головного мозга в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни, обусловленной воздействием локальной вибрации. . . . . **982**
- Газимова В.Г., Созонова Т.В., Гурвич В.Б., Альшиц Е.А., Шастин А.С., Кузьмин Д.В., Иващенко М.А.* Межведомственный регистр лиц с профессиональными болезнями: интеграция данных для сохранения трудового потенциала. . . . . **987**
- Наумова О.В., Бодиевская Г.М., Боклаженко Е.В.* Ассоциации полиморфных генов – медиаторов воспаления IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) у пациентов с вибрационной болезнью. . . . . **992**
- Черняк Ю.И., Зуева Я.И., Загузина А.Р.* Ассоциация полиморфного варианта Ala16Val гена супероксиддисмутазы 2 (rs4880) с изменениями структуры нервов у пациентов с вибрационной болезнью. . . . . **999**
- Шаяхметов С.Ф., Журба О.М., Алексеенко А.Н., Меринов А.В.* Гидроксированные полициклические ароматические углеводороды как биомаркеры воздействия на работников производства алюминия. . . . . **1005**

**ГИГИЕНА ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ**

- Зайцева Н.В., Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А.* Особенности патогенетических механизмов развития негативных эффектов у детей в условиях аэрогенного воздействия металлов: количественная оценка причинно-следственных связей. . . . . **1011**
- Кучма В.Р., Поленова М.А., Седова А.С., Вирабова А.Р., Вирабова А.Р.* Гигиеническая оценка напряжённости образовательной деятельности обучающихся на уроке. . . . . **1020**
- Сетко Н.П., Лукьянов С.Э., Сетко А.Г., Жданова О.М.* Особенности психофизиологического состояния детей и подростков в зависимости от продолжительности использования различных электронных средств обучения . . . . . **1027**

**ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ И ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ**

- Якимова Н.Л., Новиков М.А., Скрынник А.С., Лизарев А.В.* Оценка нейротропности нанокompозита оксида железа (II, III) в динамике постконтактного периода по изменению показателей электроэнцефалографии и поведенческих реакций у крыс. . . . . **1036**
- Вокина В.А., Соседова Л.М., Панкова А.А., Абрамова В.А., Титов Е.А., Новиков М.А.* Отдалённые последствия острой интоксикации торфяным дымом в период полового созревания в эксперименте на животных. . . . . **1043**
- Новиков М.А., Титов Е.А., Панкова А.А., Лисецкая Л.Г., Соседова Л.М.* Гистоморфологическая оценка перорального воздействия нанокompозита гадолиния на почки и печень белых крыс. . . . . **1049**

**СОЦИАЛЬНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ**

- Ефимова Н.В., Мыльникова И.В., Богданова О.Г.* Коэффициент полового диморфизма длины тела взрослых как критерий социально-экологического благополучия. . . . . **1055**
- Егорова Н.А., Кочеткова М.Г., Рыжова И.Н.* Значение природно-климатических факторов в социально-гигиеническом мониторинге. Часть 3: Солнечная активность и болезни системы кровообращения (нарративный обзор литературы). . . . . **1060**

12 times a year.  
 Founded in 1910.

Media Registration Certificate  
 PI N 77-37884 from 02.10.2009.

All rights reserved.

No part of the publication  
 can be reproduced without  
 the written consent of editorial office.

Any reprint of publications with consent  
 of editorial office should obligatorily contain  
 the reference to the "Gigiena  
 i Sanitaria" provided the work  
 is properly cited.

The content of the advertisements  
 is the advertiser's responsibility.

#### Address of the editorial office

Semashko street, 2, Mytishchi, Moscow  
 Region, 141014, Russian Federation

#### Head of the editorial office

Svetlana L. Serebrennikova  
 E-mail: gigan@list.ru

#### The journal's website:

<https://www.rjhas.ru>  
<https://www.гигиенаисанитария.рф>

#### Electronic journal version:

[https://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=7769](https://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=7769)  
<https://cyberleninka.ru/journal/n/gigiena-i-sanitariya>

#### Publisher

Federal Scientific Center of Hygiene named  
 after F.F. Erisman of the Federal Service  
 for Supervision in Protection  
 of the Rights of Consumer  
 and Man Wellbeing

Semashko street, 2, Mytishchi, Moscow  
 Region, 141014, Russian Federation

Phone: +7 495 586 11 44

<https://фнцг.рф>

Literary Editor: E.S. Nersesova

Web Editor: N.E. Lyublev

Translator: L.D. Shakina

Proofreader: M.V. Kozlova

Layout Editor: S.M. Meshkorudnikova

ISSN 0016-9900 (Print).

ISSN 2412-0650 (Online).

Gig. Sanit. 2026. 105(9).

Pp. 943-1066.

Put in a set: September 29, 2026

Signed to the press: October 15, 2026

Published: October 20, 2026

Format 60 × 90 1/8. Offset printing.

Printed sheet 16.0.

Circulation of 1000 copies. Free price.

Printed in the printing house  
 of FBUI FCGiE Rospotrebnadzor,  
 Varshavskoe highway, 19 A, Moscow, 117105,  
 Russian Federation

© F.F. Erisman Federal Scientific Hygiene Center,  
 Federal Service for Surveillance on Consumer  
 Rights Protection and Human Wellbeing, 2026



Read  
 online

## ENVIRONMENTAL HYGIENE

- Zaitseva N.V., May I.V., Kleyan S.V., Nurislamova T.V., Starchikova M.O., Zagorodnov S.Yu., Balashov S.Yu.* Hygienic assessment of ambient air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons in emissions from autonomous heat supply sources using various types of solid fuel. . . . . **948**
- Kushnerova N.F., Momot T.V., Rakhmanin Yu.A., Ryzhova I.N., Fomenko S.E., Sprygin V.G.* Ethnic differences in lipid composition and physiological characteristics of erythrocytes in the indigenous and alien populations of Russia north areas. . . . . **956**
- Melnikov O.A., Zheronov Yu.V., Bolekhan V.N., Kraevoy S.A., Yudin S.M.* European experience in the development of national wastewater-based epidemiology systems. Part 2: Analysis of key practices. . . . . **965**
- Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Stratan G.S., Alekseev M.M., Malysheva A.G., Yudin S.M.* Hygienic assessment of the quality of water bodies and water supply systems in one of the industrial cities of the Moscow Region (Krasnoarmeysk). . . . . **975**

## OCCUPATIONAL HEALTH

- Shevchenko O.I., Lakhman O.L., Slivnitsyna N.V., Rusanova D.V.* Changes in the functional activity of the brain depending on the severity of vibration disease caused by exposure to local vibration. . . . . **982**
- Gazimova V.G., Sozonova T.V., Gurvich V.B., Al'shic E.A., Shastin A.S., Kuzmin D.V., Ivashchenko M.A.* Interdepartmental Occupational Disease Registry: Data integration for maintaining labor potential. . . . . **987**
- Naumova O.V., Bodienkova G.M., Boklazhenko E.V.* Associations of polymorphic genes encoding the inflammatory mediators *IL-6* (*rs1800795*) and *TNF* (*rs1800629*) with cytokine levels in patients with vibration disease. . . . . **992**
- Chernyak Yu.I., Zueva Ya.I., Zaguzina A.R.* Association of the Ala16Val polymorphism in superoxide dismutase 2 gene (*rs4880*) with nerve structure changes in patients with vibration syndrome. . . . . **999**
- Shayakhmetov S.F., Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Merinov A.V.* Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in workers of aluminum production. . . . . **1005**

## HYGIENE OF CHILDREN AND ADOLESCENTS

- Zaitseva N.V., Koldibekova Yu.V., Zemlyanova M.A.* Pathogenetic pathways of adverse health effects in children exposed to airborne metals: quantification of cause-effect relations. . . . . **1011**
- Kuchma V.R., Polenova M.A., Sedova A.S., Virabova A.R.* Hygienic assessment of the intensity of educational activities of students in the lesson. . . . . **1020**
- Setko N.P., Lukyanov S.E., Setko A.G., Zhdanova O.M.* Features of the psychophysiological state in children and adolescents depending on the time of the use of various electronic learning tools. . . . . **1027**

## PREVENTIVE TOXICOLOGY AND HYGIENIC STANDARTIZATION

- Yakimova N.L., Novikov M.A., Skrynnik A.S.* Evaluation of the neurotropism of iron (II, III) oxide nanocomposite in the course of the post-exposure period, based on changes in electroencephalography parameters and behavioral reactions in rats. . . . . **1036**
- Vokina V.A., Sosodova L.M., Pankova A.A., Abramova V.A., Titov E.A., Novikov M.A.* Remote consequences of acute peat smoke intoxication during puberty in an animal experiment. . . . . **1043**
- Novikov M.A., Titov E.A., Pankova A.A., Lisetskaya N.G., Sosodova L.M.* Histo-morphological assessment of the effects of gadolinium nanocomposite on the kidneys and liver of white rats. . . . . **1049**

## SOCIO-HYGIENIC MONITORING

- Efimova N.V., Mylnikova I.V., Bogdanova O.G.* The coefficient of sexual dimorphism height of young adults as a criterion of social and environmental well-being. . . . . **1055**
- Egorova N.A., Kochetkova M.G., Ryzhova I.N.* The importance of natural and climatic factors in social and hygienic monitoring (narrative literature review, part 3). Solar activity and diseases of the circulatory system. . . . . **1060**



Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Нурисламова Т.В., Старчикова М.О.,  
Загороднов С.Ю., Балашов С.Ю.

## Гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами при выбросах автономных источников теплоснабжения, использующих различные виды твёрдого топлива

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»  
Роспотребнадзора, 614045, Пермь, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), обладающие канцерогенной и мутагенной активностью, являются приоритетными загрязнителями атмосферного воздуха в условиях применения в энергетике твёрдых топлив.

**Цель исследования** — сравнительный анализ качественного и количественного состава ПАУ в выбросах автономных источников теплоснабжения (АИТ), использующих различные виды твёрдого топлива, и гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха.

**Материалы и методы.** Экспериментальное исследование ПАУ в выбросах выполняли для типовой отопительной печи АИТ при сжигании берёзовых дров, древесных пеллет, бурого и каменного угля на стадиях розжига и стационарного горения. Нафталин, 2-метилнафталин, антрацен, 9-метилантрацен, пирен и бенз(а)пирен определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Модельные расчёты рассеивания проводили для условной группы из 48 АИТ по стандартизованным методикам. Гигиеническую оценку выполняли по критериям ПДК<sub>сс</sub> и критериям риска для здоровья с применением факторов относительной канцерогенной активности.

**Результаты.** Наибольшее суммарное содержание ПАУ на стадии розжига зафиксировано для углей (0,000962 мг/м<sup>3</sup> — для бурого, 0,00207 мг/м<sup>3</sup> — для каменного) с образованием высокомолекулярных ПАУ — пирена и бенз(а)пирена (до 0,00113 ± 0,000204 и 0,000897 ± 0,000188 мг/м<sup>3</sup> соответственно). Минимальное суммарное содержание ПАУ (0,000283 мг/м<sup>3</sup>) с преобладанием нафталина и 2-метилнафталина отмечено при использовании древесных пеллет. Концентрации бенз(а)пирена на стадии розжига были выше, чем при стационарном горении, в 2–18 раз. В ситуационном моделировании уровней загрязнения воздуха превышения ПДК<sub>сс</sub> выявлены только у бенз(а)пирена (до 10 ПДК<sub>сс</sub> при сжигании бурых углей).

**Ограничения исследования.** Исследования выполнены на одной модели печи при ограниченном числе повторностей.

**Заключение.** ПАУ в разных сочетаниях и концентрациях присутствуют в выбросах АИТ при применении всех видов твёрдых топлив. Сжигание углей формирует наибольшие риски для здоровья населения. Целесообразно проведение регулярного контроля содержания комплекса ПАУ в выбросах при использовании твёрдого топлива. Разработку и оценку эффективности региональных программ по снижению загрязнения атмосферного воздуха в населённых пунктах с развитым твердотопливным отоплением рекомендуется проводить с учётом расчётных данных о рисках для здоровья.

**Ключевые слова:** полициклические ароматические углеводороды; ПАУ; высокоэффективная жидкостная хроматография; атмосферный воздух; твёрдое топливо; гигиеническая оценка

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике.

**Для цитирования:** Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Нурисламова Т.В., Старчикова М.О., Загороднов С.Ю., Балашов С.Ю. Гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами при выбросах автономных источников теплоснабжения, использующих различные виды твёрдого топлива. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 958–955. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955> <https://elibrary.ru/utaoen>

**Для корреспонденции:** Май Ирина Владиславовна, e-mail: [may@fcrisk.ru](mailto:may@fcrisk.ru)

**Вклад авторов:** Зайцева Н.В. — дизайн исследования, научная консультация; Май И.В. — дизайн исследования, написание текста; Клейн С.В. — написание текста, редактирование; Нурисламова Т.В. — написание текста, анализ данных литературы; Старчикова М.О. — сбор материала, обработка данных; Загороднов С.Ю. — выполнение расчётов, обработка данных; Балашов С.Ю. — выполнение расчётов, построение карт. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 07.07.2026 / Поступила после доработки: 20.08.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Nina V. Zaitseva, Irina V. May, Svetlana V. Kleyn, Tatyana V. Nurislamova, Maria O. Starchikova, Sergey Yu. Zagorodnov, Stanislav Yu. Balashov

## Hygienic assessment of ambient air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons in emissions from autonomous heat supply sources using various types of solid fuel

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies of the Federal Service for Surveillance over Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Perm, 614045, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) which have carcinogenic and mutagenic effects are priority ambient air pollutants on territories where energy sector use solid fuel.

**The aim of this study** was to comparatively analyze quantitative and qualitative composition of PAH in emissions from autonomous heating sources (AHS) upon use of various fossil fuels and perform hygienic assessment of ambient air pollution.

**Materials and methods.** An experimental study of PAH in emissions was conducted for a typical heating furnace fueled by using birch firewood, wooden pellets, brown coal and coal. Naphthalene, 2-methyl-naphthalene, anthracene, 9-methyl-anthracene, pyrene and benzo(a)pyrene were quantified by using high-performance liquid chromatography with fluorometric detection. Model calculations of dispersion were accomplished for a simulated group of forty eight AHS stoves according to standardized methods. Hygienic assessment involved using average daily MPC and health risk criteria using factors of relative carcinogenic activity.

**Results.** The highest total PAH contents at the ignition stage were detected for coals ( $0.962 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for brown coal,  $2.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  for coal) with the most intensive formation of high-molecular PAH, pyrene and benzo(a)pyrene (in coal ignition:  $1.132 \pm 0.204$  and  $0.897 \pm 0.188 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectively). The lowest total PAH contents ( $0.283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) with prevailing naphthalene and 2-methyl-naphthalene were detected for use of wooden pellets. Benzo(a)pyrene concentrations were 2–18 times higher during ignition against stationary burning. Situational simulation of ambient air pollution revealed that only benzo(a)pyrene concentrations exceeded average daily MPC.

**Limitations.** The study was accomplished only for one type of furnace and involved limited number of repetitions.

**Conclusion.** PAH occur in emissions from AHS in different combinations and concentrations upon use of all kinds of fossil fuels. Regular monitoring of PAH emissions from solid fuel use is advisable. The development and effectiveness of regional air pollution reduction programs in communities with extensive solid fuel heating systems should be based on health risks assessment.

**Keywords:** polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs; high-performance liquid chromatography; atmospheric air; solid fuel; hygienic assessment

**Compliance with ethical standards.** This study does not require approval of a biomedical ethics committee.

**For citation:** Zaitseva N.V., May I.V., Kleyn S.V., Nurislamova T.V., Starchikova M.O., Zagorodnov S.Yu., Balashov S.Yu. Hygienic assessment of ambient air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons in emissions from autonomous heat supply sources using various types of solid fuel. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(9): 948–955. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955> <https://elibrary.ru/utaoen> (In Russ.)

**For correspondence:** Irina V. May, e-mail: may@fcrisk.ru

**Contribution:** Zaitseva N.V. – study concept and design; May I.V. – study design, writing the text; Kleyn S.V. – writing the text, editing; Nurislamova T.V. – writing the text, literature data collection and analysis; Starchikova M.O. – data collection, data analysis; Zagorodnov S.Y. – performing calculations, data analysis; Balashov S.Yu. – performing calculations, plotting maps. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: July 7, 2026 / Revised: August 20, 2026 / Accepted: , 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

На территориях страны с низким уровнем газификации в системах тепло- и электрогенерации широко применяется твердое топливо, в том числе его используют домохозяйства с автономными источниками теплоснабжения (АИТ) [1, 2]. АИТ, как правило, имеют невысокие трубы для отходящих газов (не выше 5–8 м над поверхностью земли), не обеспечены специальными пылегазоочистными устройствами и формируют загрязнение непосредственно в зонах постоянного проживания населения [3]. Поэтому актуальна задача гигиенической оценки соблюдения ПДК полициклических ароматических соединений (ПАУ) как наиболее опасных компонентов выбросов в зонах влияния АИТ [4–6].

С гигиенических позиций интерес к ПАУ обусловлен их высокой биологической активностью. Многие соединения этой группы, в первую очередь бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен, нафталин, аценафтилен, обладают токсическим, канцерогенным, мутагенным и иммунотоксическим действием и представляют серьезную опасность для окружающей среды и здоровья человека [7]. Одним из наиболее распространенных, стабильных и высокоактивных соединений данной группы, присутствующих в атмосферном воздухе, является бенз(а)пирен [8]. Образование бенз(а)пирена и других ПАУ связано с высокотемпературными процесса-

ми термического разложения и неполного сгорания органического топлива, в том числе угля, нефти, древесины [9]. Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицирует бенз(а)пирен как канцероген 1-й группы, вещество с доказанной канцерогенностью для человека [10]. В Российской Федерации установлены предельно допустимые среднесуточная и среднегодовая концентрации бенз(а)пирена на уровне  $0,000001 \text{ мг}/\text{м}^3$ , он относится к 1-му классу опасности (чрезвычайно опасные вещества)<sup>1</sup>. Долгопериодные гигиенические нормативы для таких ПАУ, как нафталин, антрацен, метилантрацен, метилнафталин, в настоящее время не установлены.

В научной литературе накоплен обширный материал по эмиссии ПАУ при сжигании различных видов топлива. В работах отечественных [11, 12] и зарубежных [5, 6, 13–15] авторов показана зависимость количественного и качественного состава ПАУ от температуры горения, содержания кислорода в зоне реакции, влажности и химического состава топлива. При этом остаются малоизученными закономер-

<sup>1</sup> СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2. [Электронный ресурс]. КОДЕКС. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 19.06.2026 г.).

ности изменения профилей ПАУ при переходе от розжига к стационарному горению, а также вклад метилированных производных ПАУ, для которых гигиенические нормативы в атмосферном воздухе в настоящее время отсутствуют. Недостаточная изученность данных соединений может приводить к неполной оценке потенциального риска воздействия продуктов сгорания на здоровье населения и окружающую среду.

**Цель исследования** — сравнительный анализ качественного и количественного состава ПАУ в выбросах автономных источников теплоснабжения при использовании различных видов твёрдого топлива (древесина, пеллеты, каменный и бурый уголь) на этапах розжига и стационарного горения и гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха данными соединениями в зонах влияния источников.

## Материалы и методы

Объект исследования — пробы пылегазовых выбросов, отобранные при сжигании твёрдого топлива: пеллеты древесные (гранулы из хвойных пород древесины, 8 мм), дрова берёзовые (размер колки дров средней, сухие, с берестой), уголь бурый (марка ЗБОМ, класс крупности 10–50 мм), уголь каменный сортовой (длиннопламенный плита-кулак, класс крупности 50–300 мм) с дровами берёзовыми колотыми для прогрева угля. Для сжигания всех исследуемых видов твёрдого топлива использовали печь отопительную (670 × 350 × 600 мм) длительного горения «Ермак-Термо 100» (мощность 6 кВт, КПД 80%, диаметр дымохода 115 мм, высота трубы 3000 мм).

Процесс сжигания бурого и каменного угля включал несколько последовательных этапов: предварительный прогрев печи с использованием 2 кг мелких дров, последующую закладку 2,5 кг дров, этап розжига с добавлением 5 кг угля, стационарный режим горения топлива. Сжигание древесных пеллет и берёзовых дров осуществляли по аналогичной схеме за исключением этапа закладки дров.

Отбор разовых проб воздуха проводили на расстоянии 1 м от устья источника путём аспирации через кварцевые фильтры со скоростью 100 дм³/мин в процессе разжигания (25 мин), затем стационарного горения (25 мин) трёх партий каждого вида твёрдого топлива. Все партии топлива сжигали отдельно с повторным розжигом и полным сгоранием. После каждого эксперимента установка подвергалась полной очистке. При отборе проб фиксировали температуру воздуха и атмосферное давление.

Измерения исследуемых ПАУ проводили в соответствии с МУК 4.1.3985–24 «Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов (нафталин, 2-метилнафталин, антрацен, 9-метилантрацен, пирен, бенз(а)пирен) в атмосферном воздухе методом высокоэффективной жидкостной хроматографии». Фильтры экстрагировали 10 см³ ацетонитрила, 1 см³ полученного экстракта переносили в хроматографическую вialу и анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием (ВЭЖХ-ФЛД). Анализ шести ПАУ проводили на жидкостном хроматографе Prominence Shimadzu с флуориметрическим детектором на колонке с обращённой фазой C18 Zorbax Eclipse РАН с параметрами 4,6 × 50 мм, зернением 3,5 мкм в условиях градиентного элюирования смесью ацетонитрила и воды со скоростью 0,8 см³/мин и температурой колонки плюс 30 °С. Детектирование анализов выполняли в режиме программирования оптимальных длин волн ( $\lambda$ ) возбуждения ( $E_x$ ) и эмиссии ( $E_m$ ) флуориметрического детектора: 4,9 мин:  $\lambda$   $E_x/E_m$  = 270/335 нм; 6 мин: 249/402 нм; 7,4–8,5 мин: 245/390 нм; 9,5 мин: 265/412 нм.

Степень извлечения ПАУ с фильтров составляет 90–100%; относительная погрешность измерений — 19–25%. Нижний предел измерений концентрации нафталина, 2-метилнафталина в атмосферном воздухе, согласно методике, составляет 0,0000001 мг/м³, антрацена, 9-метилантрацена, пирена — 0,00000007 мг/м³, бенз(а)пирена — 0,00000004 мг/м³.

Установленные концентрации ПАУ в выбросах применяли в модельном расчёте рассеивания примесей от  $\approx$  50 сгруппированных источников, имитирующих частные домохозяйства. Все источники были приняты идентичными с параметрами: высота источников 6 м; диаметр устья 0,16 м; объём газозвушной смеси 0,04 м³/с; скорость выхода газозвушной смеси 1,29–1,874 м/с; температура — плюс 124 °С. Расчёт выполняли с применением унифицированной программы «Эколог-город» v.4.70, реализующей утверждённые «Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (приказ Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273). Регулярная сетка 1000 × 1000 м имела шаг 50 м.

Сравнение результатов проводили по отношению к гигиеническим нормативам: ПДК<sub>с.с.</sub> (для бенз(а)пирена — 0,000001 мг/м³), ПДК<sub>м.р.</sub> (для нафталина — 0,007 мг/м³), ОБУВ (для 2-метилнафталина — 0,02 мг/м³, антрацена — 0,01 мг/м³, пирена — 0,001 мг/м³)<sup>1</sup>. Для статистической обработки применяли программу Microsoft Office Excel 2010. Рассчитывали средние значения концентраций ( $M$ ) и их стандартные ошибки ( $\pm m$ ).

Оценку канцерогенного риска в зонах влияния выбросов, содержащих ПАУ, выполняли по стандартизованным методикам. Величину канцерогенного потенциала (слууп-фактор, SF) при ингаляционном поступлении бенз(а)пирена принимали равным 3,9 мг/кг/сут; для нафталина — 0,12. Для антрацена рассчитывали слууп-фактор через значение фактора относительной активности ( $SF = SF_e \cdot PEF$ ), где PEF антрацена принимали равным 0,32; в качестве эталонного вещества рассматривали бенз(а)пирен ( $SF_e = 3,9$ ). Соответственно  $SF_{\text{антрацена}}$  составил 1,25 мг/кг/сут (приложение П 1.4, Приложение 5, Р 2.1.10.3968–23<sup>2</sup>). Для прочих идентифицированных ПАУ слууп-фактор принимали на уровне 0,7 мг/кг/сут, как для полициклических органических веществ (CAS 65996-93-2)<sup>2</sup>.

## Результаты

В результате анализа отобранных проб атмосферного воздуха установлено присутствие нафталина, антрацена, пирена, бенз(а)пирена и их метилпроизводных (2-метилнафталина, 9-метилнафталина) в атмосфере в период розжига и сжигания всех исследуемых типов топлива. Полученные средние значения разовых концентраций ПАУ представлены в табл. 1, 2. Анализ результатов, представленных в табл. 1, показал, что при разжигании печей различными видами твёрдого топлива в выбросах обнаруживаются все исследуемые ПАУ, уровень содержания каждого ПАУ зависит от вида исследуемого топлива. Наибольшее суммарное содержание ПАУ на стадии розжига фиксируется при использовании углей (0,000962 мг/м³ для бурого и 0,00207 мг/м³ для каменного угля) с наиболее интенсивным образованием высокомолекулярных ПАУ — пирена и бенз(а)пирена.

Минимальное суммарное содержание ПАУ (0,000283 мг/м³) отмечено при использовании древесных пеллет. В структуре выброса преобладали более летучие низкомолекулярные соединения — нафталин и его метилпроизводное.

На этапе стационарного горения (см. табл. 2) масса выбрасываемых ПАУ снижалась практически у всех видов топлива и всех видов веществ. Особенно значительно выброс сокращался при использовании углей: на 34% при сжигании бурого и на 80% — при сжигании каменного угля. При применении пеллет концентрации ПАУ на стадии стационарного горения близки к уровню стадии розжига, что свидетельствует о быстром старте процесса горения и его выходе

<sup>2</sup> Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду», утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации 05.03.2004 г. [Электронный ресурс]. КОДЕКС. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304711431> (дата обращения: 19.06.2026 г.).

Таблица 1 / Table 1

**Концентрации ПАУ в выбросах при режиме разжигания печи,  $M \pm m$** PAH concentrations in emissions in the solid fuel ignition mode,  $M \pm m$ 

| ПАУ<br>PAH                                    | Концентраций ПАУ, мг/м³, долевой вклад в сумму ПАУ (%)<br>PAH concentrations, mg/m³, share contribution to the amount of PAHs (%) |                                   |                              |                              |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                               | Берёзовые дрова<br>Birch firewood                                                                                                 | Древесные пеллеты<br>Wood pellets | Бурый уголь<br>Brown coal    | Каменный уголь<br>Coal       |
| Нафталин<br>Naphthalene                       | 0.00030 ± 0.00006 (57.9)                                                                                                          | 0.00012 ± 0.00002 (42.39)         | 0.00001 ± 0.000001 (1.04)    | 0.00001 ± 0.000001 (0.48)    |
| 2-Метилнафталин<br>2-Methylnaphthalene        | 0.00007 ± 0.00001 (13.51)                                                                                                         | 0.00005 ± 0.00001 (17.66)         | 0.00001 ± 0.0000013 (1.04)   | 0.00001 ± 0.000001 (0.48)    |
| Антрацен<br>Anthracene                        | 0.0000004 ± 0.0000001 (0.08)                                                                                                      | 0.0000003 ± 0.0000001 (0.11)      | 0.000002 ± 0.0000003 (0.21)  | 0.000005 ± 0.0000009 (0.26)  |
| 9-Метилантрацен<br>9-Methylanthracene         | 0.0000006 ± 0.0000002 (0.12)                                                                                                      | 0.0000008 ± 0.0000002 (0.28)      | 0.000007 ± 0.000001 (0.73)   | 0.0000165 ± 0.0000035 (0.80) |
| Пирен<br>Pyrene                               | 0.000019 ± 0.000003 (3.67)                                                                                                        | 0.000021 ± 0.0000052 (7.42)       | 0.000295 ± 0.000053 (30.67)  | 0.001132 ± 0.000204 (54.66)  |
| Бенз(а)пирен<br>Benz(a)pyrene                 | 0.000128 ± 0.000027 (24.71)                                                                                                       | 0.000091 ± 0.000019 (32.14)       | 0.000638 ± 0.000134 (66.32)  | 0.000897 ± 0.000188 (43.32)  |
| Суммарное<br>содержание ПАУ<br>Amount of PAHs | 0.000518 ± 0.000100 (100.0)                                                                                                       | 0.0002831 ± 0.000055 (100.0)      | 0.000962 ± 0.0001906 (100.0) | 0.0020708 ± 0.000398 (100.0) |

Таблица 2 / Table 2

**Концентрации ПАУ в выбросах печи при режиме стационарного горения твёрдого топлива**

PAH concentrations in emissions in the steady-state combustion mode of solid fuel

| ПАУ<br>PAH                                    | Концентраций ПАУ, мг/м³, долевой вклад в сумму ПАУ (%)<br>PAH concentrations, mg/m³, share contribution to the amount of PAHs (%) |                                   |                              |                              |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                               | Берёзовые дрова<br>Birch firewood                                                                                                 | Древесные пеллеты<br>Wood pellets | Бурый уголь<br>Brown coal    | Каменный уголь<br>Coal       |
| Нафталин<br>Naphthalene                       | 0.00021 ± 0.00004 (77.23)                                                                                                         | 0.00026 ± 0.00005 (69.95)         | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)      | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)      |
| 2-Метилнафталин<br>2-Methylnaphthalene        | 0.00005 ± 0.00001 (18.39)                                                                                                         | 0.00007 ± 0.00001 (18.83)         | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)      | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)      |
| Антрацен<br>Anthracene                        | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)                                                                                                           | < НПО (0)<br>< LLOQ (0)           | 0.0000054 ± 0.0000009 (0.84) | 0.000012 ± 0.000002 (3.19)   |
| 9-Метилантрацен<br>9-Methylanthracene         | 0.0000019 ± 0.0000004 (0.70)                                                                                                      | 0.0000087 ± 0.0000018 (2.34)      | 0.0000007 ± 0.0000002 (0.11) | 0.0000194 ± 0.0000041 (5.15) |
| Пирен<br>Pyrene                               | 0.000003 ± 0.000001 (1.10)                                                                                                        | 0.000018 ± 0.000005 (4.84)        | 0.000302 ± 0.000054 (47.18)  | 0.000137 ± 0.000025 (36.40)  |
| Бенз(а)пирен<br>Benz(a)pyrene                 | 0.000007 ± 0.000001 (2.57)                                                                                                        | 0.000015 ± 0.000003 (4.04)        | 0.000332 ± 0.000069 (51.87)  | 0.000208 ± 0.000044 (55.26)  |
| Суммарное<br>содержание ПАУ<br>Amount of PAHs | 0.000272 ± 0.000043 (100.0)                                                                                                       | 0.000372 ± 0.000069 (100.0)       | 0.0006401 ± 0.000124 (100.0) | 0.000376 ± 0.000075 (100.0)  |

Примечание. НПО — ниже порога определения.

Note: LLOQ — below the limit of detection.

на постоянный режим. Выбросы ПАУ при применении древесного топлива (дрова и пеллеты) остаются более низкими, чем при применении углей.

Выявленная в составе выбросов структура ПАУ позволяет рассматривать нафталины (нафталин и 2-метилнафталин) как маркёры применения древесного топлива, пирен и бенз(а)пирен — угольного топлива, что в определённых ситуациях может использоваться для идентификации возможных источников загрязнения.

В целом полученные экспериментальные данные позволили выполнить сценарное моделирование и оценку санитарно-эпидемиологической ситуации в зонах влияния 48 однотипных АИТ, имитирующих частную жилую

застройку. Отсутствие среднесуточных гигиенических нормативов для пяти из выявленных ПАУ не позволяет оценить ситуацию по группе показателей. В качестве примера на рис. 1, 2 (см. на вклейке) показаны поля приземных концентраций бенз(а)пирена как наиболее опасного и нормируемого компонента на модельной территории размещения АИТ с разными видами топлива.

Установлено, что применение угольного топлива формирует наибольшие зоны влияния и наиболее высокие приземные концентрации и на стадии розжига, и при стационарном горении. Так, при использовании каменного угля в период розжига приземные концентрации бенз(а)пирена выше 1 ПДК<sub>с.с.</sub> фиксируются на расстоянии до 550–700 м.

Таблица 3 / Table 3

**Среднегодовая приземная расчётная концентрация ПАУ и канцерогенный риск в точке максимума при сценарном моделировании работы группы АИТ (розжиг и 9 мес работы котлов по 7 ч в день)**

Annual average ground-level PAH concentration and carcinogenic risk at the point of maximum a scenario-based simulation of the autonomous heat supply source (ignition and 9 months of boiler operation, 7 h/day)

| ПАУ в составе выбросов<br>PAHs in emissions                             | Используемое топливо   Fuel used      |                                      |                                          |                                          |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                                                         | Берёзовые дрова<br>Birch firewood     | Древесные пеллеты<br>Wood pellets    | Бурый уголь<br>Brown coal                | Каменный уголь<br>Coal                   |
| <i>Среднегодовая экспозиция, мг/м³   Annual average exposure, mg/m³</i> |                                       |                                      |                                          |                                          |
| Нафталин   Naphthalene                                                  | 2.63,00E–05                           | 3.71E–05                             | < 1.0E–10                                | < 1.0E–10                                |
| 2-Метилнафталин   2-Methylnaphthalene                                   | 1.25E–05                              | 1.00E–05                             | < 1.0E–10                                | < 1.0E–10                                |
| Антрацен   Anthracene                                                   | < 1.0E–10                             | < 1.0E–10                            | 2.778E–07                                | 5.21E–07                                 |
| 9-Метилантрацен   9-Methylanthracene                                    | 2.71E–07                              | 1.24E–06                             | 1.17E–07                                 | 2.77E–06                                 |
| Пирен   Pyrene                                                          | 4.29E–07                              | 2.57E–06                             | 1.00E–07                                 | 1.96E–05                                 |
| Бенз(а)пирен   Benz(a)pyrene                                            | 1.00E–06                              | 2.00E–06                             | 5.53E–05                                 | 4.16E–05                                 |
| <i>Канцерогенный риск   Cancer risk</i>                                 |                                       |                                      |                                          |                                          |
| Нафталин   Naphthalene<br>SF = 0.12                                     | 3.15E–06                              | 4.46E–06                             | < 1.0E–10                                | < 1.0E–10                                |
| 2-Метилнафталин   2-Methylnaphthalene<br>SF = 0.7                       | 8.75E–06                              | 7.00E–06                             | < 1.0E–10                                | < 1.0E–10                                |
| Антрацен   Anthracene<br>SF = 1.25                                      | < 1.0E–10                             | < 1.0E–10                            | 3.46E–07                                 | 6.51E–07                                 |
| 9-Метилантрацен   9-Methylanthracene<br>SF = 0.7                        | 1.90E–07                              | 8.70E–07                             | 8.17E–08                                 | 1.94E–06                                 |
| Пирен   Pyrene<br>SF = 0.7                                              | 3.00E–07                              | 1.80E–06                             | 7.00E–08                                 | 1.37E–05                                 |
| Бенз(а)пирен   Benz(a)pyrene<br>SF = 3.9                                | 3.90E–06                              | 7.80E–06                             | 2.16E–04                                 | 1.62E–04                                 |
| Суммарный риск   Total risk                                             | 1.673E–05<br>Приемлемый<br>Acceptable | 2.14E–05<br>Приемлемый<br>Acceptable | 2.59E–04<br>Неприемлемый<br>Unacceptable | 1.63E–04<br>Неприемлемый<br>Unacceptable |

Розжиг котлов на древесных пеллетах формирует зону загрязнения на расстоянии порядка 300–450 м от крайних источников. Дровяные печи на стадии розжига формируют загрязнение бенз(а)пиреном, близкое к пеллетам, печи на буром угле — к работающим на каменном угле.

Суточные концентрации бенз(а)пирена выше ПДК<sub>с.с.</sub> на стадиях стационарного горения в модельной ситуации регистрировали при применении пеллет и (или) берёзовых дров на расстоянии от 120 до 250 м от крайних источников, при применении угля (бурого и каменного) — на расстоянии 400–450 м. Соответственно зона загрязнения при прочих равных в условиях применения углей в качестве топлива может быть в 4–5 раз больше, чем при применении древесного топлива.

Вместе с тем полученные данные подтвердили, что низкие АИТ, не оборудованные специальными средствами очистки газов, являются источниками загрязнения атмосферного воздуха в местах постоянного проживания населения, особенно в зимний отопительный период.

Учёт суммарной экспозиции, формируемой нафталином, антраценом и бенз(а)пиреном — веществами, для которых количественно определены коэффициенты канцерогенного потенциала, — позволяет оценить и сопоставить уровни канцерогенных рисков для модельных условий зон влияния источников (табл. 3).

Модельная ситуация свидетельствует о возможности формирования неприемлемого канцерогенного риска для здоровья в условиях одновременного присутствия ряда ПАУ в составе выбросов АИТ. Неприемлемые риски (более 1,0E–04) в рассматриваемой ситуации отмечены только при сжигании угольного топлива. Бенз(а)пирен вносит основной вклад в риски для здоровья: до 90% при применении каменного угля и до 99% — при использовании бурых углей.

При сжигании древесного топлива нафталин и его производные могут формировать до 70% вклада в ингаляционный канцерогенный риск. В модельной ситуации работы АИТ на дровах и пеллетах неприемлемый риск не установлен. Вместе с тем в реальных условиях плотной городской застройки, когда домохозяйства используют АИТ, расчёт аэрогенной экспозиции и оценка рисков для здоровья целесообразны при применении любых видов твёрдого топлива.

## Обсуждение

Углублённые исследования количественного и качественного состава ПАУ в пылегазовых выбросах автономных источников теплоснабжения позволили доказательно установить, что состав данных компонентов выбросов зависит от типа используемого топлива и от стадии процесса горения. Наибольшие концентрации высокомолекулярных ПАУ обнаружены при сжигании угольного топлива на стадии розжига печей. При использовании древесного топлива в атмосферный воздух выбрасывались преимущественно низкомолекулярные ПАУ — нафталин и 2-метилнафталин. Для всех видов топлива концентрации бенз(а)пирена на этапе розжига были в 2–18 раз выше, чем в режиме стационарного горения. Особенно ярко это проявляется для каменного угля: 0,000897 против 0,000208 мг/м³ (различие в 4,3 раза). Когда температура в топке недостаточно высока и процессы окисления протекают не полностью, образуется максимальное количество продуктов неполного сгорания, в том числе высокотоксичных ПАУ. В то же время доля нафталина в стационарном режиме возрастает (с 57,6 до 77,3% для дров, с 41,7 до 70,6% — для пеллет), что обусловлено термофрагментацией высокомолекулярных ПАУ, адсорбированных на сажистых частицах, при высокой температуре.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведённых исследований, показывающих, что при горении древесины в условиях недостатка кислорода образуются преимущественно низкомолекулярные ароматические соединения, в том числе нафталин и его алкилированные производные [16, 17]. Уголь, имеющий более сложную полициклическую структуру с высокой степенью конденсации ароматических колец, при неполном сгорании высвобождает значительные количества высокомолекулярных ПАУ — пирена, бенз(а)пирена, бенз(а)антрацена [18, 19]. Преобладание в выбросах высокомолекулярных ПАУ, в том числе с канцерогенной активностью, делает угольное топливо более опасным для здоровья населения по сравнению с древесным [9].

Особого внимания заслуживает факт постоянного обнаружения метилированных производных ПАУ (2-метилнафталин и 9-метилантрацен) во всех пробах. Их суммарная доля в общем содержании ПАУ достигала 13,5–19,1% для дров и 18,2–20,5% для пеллет. Для углей она была ниже, но всё же составляла 0,1–5,1%. В настоящее время в Российской Федерации для этих соединений не установлены ни ПДК, ни ОБУВ для атмосферного воздуха. Это создаёт методическую проблему при проведении гигиенической оценки загрязнения. Метилированные производные ПАУ по сравнению с их родительскими соединениями традиционно рассматриваются реже, однако накопленные данные свидетельствуют об их значимой биологической активности. Как показано в исследованиях [20, 21], 2-метилнафталин характеризуется выраженной токсичностью в отношении дыхательной системы (способен вызывать повреждение респираторного эпителия), а 9-метилантрацен проявляет фотохимическую активность. Полученные результаты подтверждают актуальность токсикологических исследований метилированных ПАУ, разработки долгопериодных гигиенических нормативов (ПДК<sub>с.с.</sub>) этих соединений в атмосферном воздухе, а также включения метилированных ПАУ в программы мониторинга в регионах с интенсивным использованием твёрдого топлива.

В целом в условиях широкого применения АИТ на газифицированных или частично газифицированных территориях страны загрязнение атмосферного воздуха ПАУ, в том числе бенз(а)пиреном, можно считать серьёзной проблемой [22, 23]. Так, АИТ ряда городов страны, в том числе участников федерального проекта «Чистый воздух», на отдельных участках вносят до 80% вклада в загрязнение бенз(а)пиреном, а территории, на которых фиксируются превышения, составляют до 10% от площади города [3, 24, 25]. Частичная или полная замена угольных котлов частного сектора на газовые и (или) ориентированные на применение пеллет позволит улучшить санитарно-гигиеническую ситуацию, сократить зоны загрязнения и снизить риски для здоровья населения. Полученные результаты могут рассматриваться как дополнительный аргумент для разработки и реализации мероприятий по повышению экологической и гигиенической безопасности АИТ в городах их широкого применения. Следует отметить, что в Архангельской области, Республике Коми и некоторых других регионах действуют программы по переводу угольных котельных на древесное топливо, налажен выпуск соответствующего котельного оборудования<sup>3</sup>. Расширение практики совершенствования АИТ с учётом рисков для здоровья представляется важным направлением действий для многих городов с угольной энергетикой и большой долей домохозяйств, использующих локальные генерирующие источники.

<sup>3</sup> Производство пеллет в России начало опять расти. URL: <https://www.infobio.ru/news/5539.html>

**Ограничения исследования.** Исследования выполнены на одной модели печи при ограниченном числе повторностей. Неопределённости при оценке риска связаны с использованием для расчёта экспозиции ограниченных экспериментальных данных, применением при расчёте канцерогенного риска величин слоуп-факторов, установленных не для конкретных веществ, а для группы ПАУ.

## Заключение

Проведённое исследование показало, что сжигание всех изученных видов твёрдого топлива (дрова, пеллеты, бурый и каменный уголь) сопровождается поступлением в атмосферный воздух спектра ПАУ, в том числе нафталина, 2-метилнафталина, антрацена, 9-метилантрацена, пирена, бенз(а)пирена. Подтверждена и количественно определена выраженная зависимость качественного и количественного состава ПАУ от вида топлива и стадии горения. Самые высокие концентрации высокомолекулярных ПАУ выявлены при сжигании угольного топлива. Наибольшие концентрации в выбросах имели пирен ( $0,001132 \pm 0,000204$  мг/м<sup>3</sup>) и бенз(а)пирен ( $0,000897 \pm 0,000188$  мг/м<sup>3</sup>) в процессе разжигания каменного угля. В атмосферном воздухе при сжигании древесного топлива преимущественно обнаруживались низкомолекулярные ПАУ — нафталин и 2-метилнафталин. Установлено, что этап розжига всех видов топлива характеризуется в 2–18 раз более высокими концентрациями бенз(а)пирена по сравнению со стационарным горением, что указывает на актуальность плотного мониторинга санитарно-гигиенической ситуации в период старта отопительного сезона работы АИТ.

Сравнительное моделирование рассеивания выбросов показало, что в условиях плотной частной малоэтажной застройки АИТ могут быть источниками загрязнения воздуха при работе и на древесном, и на угольном топливе. Зоны загрязнения в результате работы печей на угле при прочих равных условиях в несколько раз превышают таковые при работе АИТ на дровах или пеллетах.

Идентифицированное присутствие в выбросах метилированных производных ПАУ (2-метилнафталин и 9-метилантрацен) показывает, что данные примеси необходимо учитывать при гигиенической оценке загрязнения атмосферного воздуха. Отсутствие установленных нормативов для этих соединений обуславливает важность их токсикологической оценки и разработки ПДК.

Полученные результаты подтверждают необходимость регулярного контроля содержания ПАУ в выбросах при использовании твёрдого топлива, особенно угольного, а также разработки мероприятий, направленных на снижение выбросов токсичных ПАУ, с учётом стадии розжига, минимизации риска негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Разработку и оценку эффективности региональных программ по снижению загрязнения атмосферного воздуха в населённых пунктах с развитым твердотопливным отоплением целесообразно вести с учётом расчётных данных о рисках для здоровья.

Перспективное направление дальнейших исследований — верификация расчётных данных инструментальными исследованиями качества воздуха в зонах влияния АИТ с определением структуры и количественных параметров отдельных ПАУ. Важным вектором является повышение качества исходной информации о токсикологических свойствах ПАУ для корректной оценки риска.

## Литература (п.п. 4–10, 13–20 см. References)

1. Иваницкий М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023; 25(2): 3–11. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11> <https://elibrary.ru/ufapui>
2. Зайцева Н.В., Клейн С.В., Горяев Д.В., Андришунас А.М., Балашов С.Ю., Загороднов С.Ю. Эффективность комплексных планов воздухоохраных мероприятий на объектах теплоэнергетики по критериям минимизации рисков и вреда здоровью населения. *Анализ риска здоровью*. 2023; 2: 42–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.04> <https://elibrary.ru/ultzyr>

3. Волкодаева М.В., Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Канчан Я.С., Левкин А.В., Тимин С.Д. Учёт выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчётов загрязнения атмосферного воздуха для населённых пунктов. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(2): 141–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147> <https://elibrary.ru/nybmxl>
11. Белых Л.И., Халтурина Д.А., Мухамедьянова Р.Р. Мониторинг выбросов бенз(а)пирена в атмосферу при открытом и печном горении различных материалов. *XXI век. Техносферная безопасность*. 2017; 2(1): 23–37. <https://elibrary.ru/yhffbd>
12. Хошимханова М.А., Камолов Т.О., Хамдамов Д.Х., Нурханов Ф.А., Эралиев А.А., Муносибов Ш. Современное состояние экологических проблем, образующихся при сжигании угольного топлива. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*. 2022; 2(11): 664–70.
21. Сафронов И.В., Драчкова И.А., Петрусева И.О., Ходырева С.Н., Добриков М.И., Иванова Т.М. и др. Реагенты для модификации белково-нуклеиновых комплексов. III. Сайт-специфическая фото-модификация элонгирующего комплекса ДНК-полимеразы  $\beta$  ари-лазидами производными праймеров, сенсibilизированная флуоресцентными  $\gamma$ -амидами атр. *Биоорганическая химия*. 2001; 27(5): 372–82. <https://elibrary.ru/oxrsrv>
22. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Попова А.Ю. Май И. В., Устинова О. Ю., Трусов П. и др. *Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография. В 2 томах. 2-е изд., перераб. и доп.* Москва – Пермь: Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения; 2024. 580 с. <https://elibrary.ru/vofelz>
23. Заворуева Е.Н. Динамика концентрации взвешенных частиц и бенз(а)пирена в атмосфере города Красноярск. В кн.: *Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции*. 2023: 492–6. <https://elibrary.ru/kmnpfx>
24. Глебова Л.А., Коскина Е.В., Бачина А.В. Оценка риска для здоровья населения промышленных центров Кузбасса в связи с загрязнением атмосферного воздуха. *Анализ риска здоровью*. 2025; (4): 38–46. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.04> <https://elibrary.ru/nhfwup>
25. Растоккина Т.Н., Пешкова А.А., Унгуряну Т.Н. Качество атмосферного воздуха и риск развития болезней системы кровообращения у населения крупного города Европейского Севера. *Анализ риска здоровью*. 2024; (3): 4–12. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.01> <https://elibrary.ru/fhjjaa>

## References

1. Ivanitsky M.S. Mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during fuel combustion in thermal power plant boilers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2023; 25(2): 3–11. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11> <https://elibrary.ru/ufafui> (in Russian)
2. Zaitseva N.V., Klein S.V., Goryaev D.V., Andrisunas A.M., Balashov S.Yu., Zagorodnov S.Yu. Effectiveness of comprehensive air protection plans at heat power facilities based on criteria for mitigating risks and harm to public health. *Health Risk Analysis*. 2023; 2: 42–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.04> <https://elibrary.ru/josllm> (in Russian)
3. Volkodaeva M.V., Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Kanchan Ya.S., Levkin A.V., Timin S.D. Accounting for pollutant emissions from autonomous heat sources of individual residential buildings when conducting consolidated calculations of air pollution for populated areas. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(2): 141–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147> <https://elibrary.ru/nybmxl> (in Russian)
4. Han Y., Chen Y., Feng Y., Song W., Cao F., Zhang Y., et al. Different formation mechanisms of PAH during wood and coal combustion under different temperatures. *Atmos. Environ.* 2020; 222: 117084. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117084> <https://elibrary.ru/gtrabt>
5. Zhang Y., Shen Z., Sun J., Zhang L., Zhang B., Zou H., et al. Parent, alkylated, oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in PM<sub>2.5</sub> emitted from residential biomass burning and coal combustion: a novel database of 14 heating scenarios. *Environ. Pollut.* 2021; 268: 115881. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115881> <https://elibrary.ru/yfbmpa>
6. Sekar M., Praveenkumar T.R. Critical review on the formations and exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the conventional hydrocarbon-based fuels: prevention and control strategies. *Chemosphere*. 2024; 350: 141005. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141005> <https://elibrary.ru/bqrgs>
7. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 1995. 487 p.
8. Bukowska B., Mokra K., Michałowicz J. Benzo[a]pyrene—environmental occurrence, human exposure, and mechanisms of toxicity. *Int. J. Mol. Sci.* 2022; 23(11): 6348. <https://doi.org/10.3390/ijms23116348> <https://elibrary.ru/xzpyat>
9. Feng Y., Li Z., Li W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): environmental persistence and human health risks. *Nat. Prod. Commun.* 2025; 20(1): 1934578X241311451. <https://doi.org/10.1177/1934578X241311451>
10. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. IARC; 1988. 99 p.
11. Belykh L.I., Khalturina D.A., Mukhamedyanova R.R. Monitoring of benzo(a)pyrene emissions into the atmosphere during open and furnace combustion of various materials. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2017; 2(1): 23–37. <https://elibrary.ru/yhffbd> (in Russian)
12. Khoshimkhanova M.A., Kamolov T.O., Khamdamov D.Kh., Nurkhanov F.A., Eraliev A.A., Munosibov Sh. Current state of environmental problems arising from the combustion of coal fuel. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*. 2022; 2(11): 664–70. (in Russian)
13. Feng Y., Wang J., Sun J., Cui Z., Chen Q., Mao K., et al. Emissions of nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons bound to coarse particles from solid fuel combustion. *Chemosphere*. 2024; 348: 140744. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140744> <https://elibrary.ru/blmepo>
14. Hayakawa K., Tang N., Toriba A., Nagato E.G. Calculating sources of combustion-derived particulates using 1-nitropyrene and pyrene as markers. *Environ. Pollut.* 2020; 265: 114730. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114730> <https://elibrary.ru/hhfeft>
15. Li S., Liu X., Wang J., Li J., Wang Z., Ma S., et al. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from domestic heating and cooking combustion of different fuel types for elders in rural China. *Environ. Pollut.* 2024; 357: 124416. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124416> <https://elibrary.ru/rxqkdb>
16. Skrbic B., Marinkovic V., Spaic S., Milanko V., Branovacki S. Profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoke from combustion and thermal decomposition of poplar wood pellets and sawdust. *Microchem. J.* 2018; 139: 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.007>
17. Odekanle E.L., Taiwo R.O., Sonibare J.A., Akinyemi A.O., Adekanye T.A., Fakile B.S. Estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emission and its toxicity potentials from the combustion of selected fuelwoods. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2024; 10: 100840. <https://doi.org/10.1016/j.cscce.2024.100840> <https://elibrary.ru/afoenf>
18. Yang X., Liu S., Xu Y., Liu Y., Chen L., Tang N., et al. Emission factors of polycyclic and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons from residential combustion of coal and crop residue pellets. *Environ. Pollut.* 2017; 231: 1265–73. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.087> <https://elibrary.ru/yjsezz>
19. Li X., Wang Z., Guo T. Emission of PM<sub>2.5</sub>-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass and coal combustion in China. *Atmosphere*. 2021; 12(9): 1129. <https://doi.org/10.3390/atmos12091129> <https://elibrary.ru/muavbq>
20. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). *Toxicological Profile for Naphthalene, 1-Methylnaphthalene, and 2-Methylnaphthalene. Chapter 2. Health Effects*. Atlanta (GA); 2025.
21. Safranov I.V., Drachkova I.A., Petrusheva I.O., Khodyreva S.N., Dobrikov M.I., Ivanova T.M., et al. Reagents for modifying protein-nucleic acid complexes. III. Site-specific photomodification of the elongation complex of DNA polymerase  $\beta$  by aryl azide derivatives of primers, sensitized by fluorescent  $\gamma$ -amides of atr. *Биоорганическая химия*. 2001; 27(5): 372–82. <https://elibrary.ru/oxrsrv> (in Russian)
22. Onishchenko G.G., Zaitseva N.V., Popova A.Yu., Mai I.V., Ustinova O.Yu., Trusov P.V., et al. *Health Risk Analysis in the Strategy of State Socio-Economic Development: Monograph. In 2 Volumes [Analiz riska zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: monografiya. V 2 tomakh]*. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow – Perm: Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Population Health Risk Management; 2024. 580 p. <https://elibrary.ru/vofelz> (in Russian)
23. Zavorueva E.N. Dynamics of the concentration of suspended particles and benzo(a)pyrene in the atmosphere of the city of Krasnoyarsk. In: *Current Issues in Construction: A Look into the Future [Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushchee]*. 2023: 492–6. <https://elibrary.ru/kmnpfx> (in Russian)
24. Glebova L.A., Koskina E.V., Bachina A.V. Assessment of the health risk for the population of Kuzbass industrial centers due to ambient air pollution. *Health Risk Analysis*. 2025; (4): 38–46. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.04> <https://elibrary.ru/fisdxs>
25. Rastokkina T.N., Peshkova A.A., Unguryanu T.N. Ambient air quality and risk of circulatory diseases for population of a large city in the European North of Russia. *Health Risk Analysis*. 2024; (3): 4–12. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.01> <https://elibrary.ru/eqrhme>

## Сведения об авторах

**Зайцева Нина Владимировна**, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: znv@fcrisk.ru

**Май Ирина Владиславовна**, доктор биол. наук, профессор, гл. науч. сотр. — советник директора ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: may@fcrisk.ru

**Клейн Светлана Владиславовна**, доктор мед. наук, доцент, профессор РАН, зам. директора по научной работе ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: kleyn@fcrisk.ru

**Нурисламова Татьяна Валентиновна**, доктор биол. наук, доцент, зав. отд. химико-аналитических методов исследования ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: nurtat@fcrisk.ru

**Старчикова Мария Олеговна**, науч. сотр. лаб. методов жидкостной хроматографии ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: [starchikova@fcrisk.ru](mailto:starchikova@fcrisk.ru)  
**Загороднов Сергей Юрьевич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. — руководитель экспертной группы отд. системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: [zagorodnov@fcrisk.ru](mailto:zagorodnov@fcrisk.ru)  
**Балашов Станислав Юрьевич**, ст. науч. сотр. — руководитель ГИС-группы ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: [stas@fcrisk.ru](mailto:stas@fcrisk.ru)

## About the authors

**Nina V. Zaitseva**, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, scientific director, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145> E-mail: [znv@fcrisk.ru](mailto:znv@fcrisk.ru)

**Irina V. May**, DSc (Biology), professor, principal researcher-advisor to the Director, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016> E-mail: [may@fcrisk.ru](mailto:may@fcrisk.ru)

**Svetlana V. Kleyn**, DSc (Medicine), associate professor, professor of the RAS, deputy director for Research, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713> E-mail: [kleyn@fcrisk.ru](mailto:kleyn@fcrisk.ru)

**Tatyana V. Nurislamova**, DSc (Biology), head, Department for Chemical and Analytical Research Techniques, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2344-3037> E-mail: [nurtat@fcrisk.ru](mailto:nurtat@fcrisk.ru)

**Maria O. Starchikova**, Department for Chemical and Analytical Research Techniques, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3259-1509> E-mail: [starchikova@fcrisk.ru](mailto:starchikova@fcrisk.ru)

**Sergey Yu. Zagorodnov**, PhD (Engineering), senior researcher, head, Expert Group of the Department of Systemic Methods of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6357-1949> E-mail: [zagorodnov@fcrisk.ru](mailto:zagorodnov@fcrisk.ru)

**Stanislav Yu. Balashov**, senior researcher, head, GIS Group of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6923-0539> E-mail: [stas@fcrisk.ru](mailto:stas@fcrisk.ru)

Читать  
онлайн  
Read  
onlineКушнерова Н.Ф.<sup>1</sup>, Рахманин Ю.А.<sup>2,3</sup>, Момот Т.В.<sup>4</sup>, Рыжова И.Н.<sup>2</sup>, Фоменко С.Е.<sup>1</sup>, Спрыгин В.Г.<sup>1</sup>

## Этнические различия липидного состава и физиологических характеристик эритроцитов у коренного и пришлого населения северных территорий Российской Федерации

<sup>1</sup>ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690041, Владивосток, Россия;

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт экологии человека и гигиены окружающей среды имени А.Н. Сысина, ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия;

<sup>3</sup>ФБун «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 1410014, Мытищи, Россия;

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Для освоения природных ресурсов северных территорий Российской Федерации (Чукотский АО, Эвенкийский АО, Приамурье, Ханты-Мансийский АО и др.) необходимо привлечение трудовых мигрантов. При этом экстремальные климатогеографические факторы влияют на метаболические реакции организма пришлого населения, а коренные жители имеют эволюционно обусловленную биохимическую адаптацию к климату северных территорий.

**Материалы и методы.** Проведено исследование биохимических параметров мембран эритроцитов здоровых мужчин двух этнических групп в возрасте 20–30 лет, проходящих плановый медицинский осмотр в районной больнице. Обследованы 20 мужчин пришлой популяции (европеоиды) и 20 мужчин коренной популяции чукчей (монголоиды). В группу пришлой популяции входили мужчины, проживающие на северных территориях не более двух лет, что свидетельствует о незавершенной адаптации и сохранении метаболизма, характерного для европеоидов.

**Результаты.** Проведён сравнительный анализ количественного состава фосфолипидов, жирных кислот мембран эритроцитов крови, их размерных характеристик и гемолитической устойчивости к гемолизирующему воздействию у коренной и пришлой популяций северных территорий Российской Федерации. Получены данные об этнических особенностях метаболических реакций у представителей двух этнических групп. У лиц коренной популяции (чукчи) отмечалось изменение соотношения фосфолипидных фракций в мембране эритроцитов по сравнению с таковыми у лиц пришлой популяции. Наряду с этим отмечались различия в жирнокислотном составе липидов мембран эритроцитов, что подтверждает этнические особенности лиц коренной и пришлой популяций. Выявленные различия состава полиненасыщенных жирных кислот в структурах ФХ и ФЭ предполагают появление модифицированных молекулярных видов этих фракций у лиц коренной популяции.

**Ограничения исследования.** Исследование ограничено числом обследованных лиц, проходивших плановый медицинский осмотр в районной больнице.

**Заключение.** Этнические особенности в фосфолипидной составляющей мембран эритроцитов у лиц коренной популяции обуславливают различия в размерных характеристиках эритроцитов и увеличение устойчивости клеток к гемолизирующему воздействию. Наличие этнических особенностей необходимо учитывать при назначении терапии и проведении профилактических мероприятий у групп населения конкретной географической зоны.

**Ключевые слова:** коренная популяция чукчей; пришлая популяция европеоидов; эритроциты; фосфолипиды; жирные кислоты; размеры эритроцитов; гемолитическая устойчивость

**Соблюдение этических стандартов.** Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации 1964 г. и её последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. Исследование было одобрено Комиссией по вопросам этики Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (протокол № 17 от 07.04.2021 г.). Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Кушнерова Н.Ф., Рахманин Ю.А., Момот Т.В., Рыжова И.Н., Фоменко С.Е., Спрыгин В.Г. Этнические различия липидного состава и физиологических характеристик эритроцитов у коренного и пришлого населения северных территорий Российской Федерации. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 956–964. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-956-964> <https://elibrary.ru/stxxdv>

**Для корреспонденции:** Кушнерова Наталья Федоровна, e-mail: [natasha50@mail.ru](mailto:natasha50@mail.ru)

**Вклад авторов:** Кушнерова Н.Ф. — концепция и дизайн исследования, написание текста; Рахманин Ю.А. — редактирование; Момот Т.В. — дизайн исследования, сбор и обработка материалов, написание текста; Рыжова И.Н. — сбор данных литературы; Фоменко С.Е. — сбор и обработка материала, статистическая обработка; Спрыгин В.Г. — сбор и обработка материала, статистическая обработка. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ТОИ ДВО РАН по теме «Экологические и биогеохимические процессы в экосистемах дальневосточных морей». Номер государственной регистрации 124022100077–0.

Поступила: 01.10.2025 / Поступила после доработки 13.10.2025 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Natalya F. Kushnerova<sup>1</sup>, Yury A. Rakhmanin<sup>2,3</sup>, Tatiana V. Momot<sup>4</sup>, Irina N. Ryzhova<sup>2</sup>, Svetlana E. Fomenko<sup>1</sup>, Vladimir G. Sprygin<sup>1</sup>

## Ethnic differences in lipid composition and physiological characteristics of erythrocytes in the indigenous and alien populations of Russia north areas

<sup>1</sup>V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation;

<sup>2</sup>A.N. Sysin Research Institute of Human Ecology and Environmental Health of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation;

<sup>3</sup>Federal Scientific Center of Hygiene named after F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation;

<sup>4</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University Federation (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The extreme climatic and geographical factors of the North of Russia affect the metabolic responses of the body in the alien population, which distinguishes them from those of the indigenous inhabitants.

**Materials and methods.** It was conducted a study of the biochemical parameters of erythrocyte membranes in healthy men of two ethnic groups aged 20–30 years which undergoing routine medical examination in a regional hospital. There were examined 20 men of the alien population (Caucasians) and 20 men of the indigenous Chukchi population (Mongoloids). The group of alien population included men who had been living in the North for no more than 1–2 years. This indicates incomplete adaptation and the preservation of metabolism characteristic in Caucasians.

**Results.** There was carried out a comparative analysis of the quantitative composition of phospholipids, fatty acids of erythrocyte membranes, their size characteristics and hemolytic resistance to hemolytic effects in indigenous and alien populations of the North of the Russian Federation. It has been obtained the data on the ethnic characteristics of metabolic responses in representatives of two ethnic groups. In the indigenous population (Chukchi), there was a change in the ratio of phospholipid fractions in the erythrocyte membrane compared with those in the alien population. Along with this, there were differences in the fatty acid composition of lipids in erythrocyte membranes, which confirms the ethnic characteristics of indigenous and alien populations. These differences in the composition of polyunsaturated fatty acids in the structures of PC and PE suggest the appearance of modified molecular species of these fractions in the indigenous population.

**Limitations.** The study is limited to the number of persons examined, conducted medical examination in a district hospital.

**Conclusion.** Ethnic features in the phospholipid component of erythrocyte membranes in the indigenous population cause differences in the dimension characteristics of erythrocytes and an increasing in cell resistance to hemolytic effects. In our opinion, this is not a deviation from the norm, but one of the variants of human metabolism. The presence of ethnic characteristics must be taken into consideration when appointing a therapy and carrying out preventive measures in population groups of a specific geographical area.

**Keywords:** indigenous Chukchi population; Caucasian newly arrived population; erythrocytes; phospholipids; fatty acids; diameter; volume of erythrocytes; hemolytic stability

**Compliance with ethical standards.** All procedures performed in human studies comply with the ethical standards of the National Research Ethics Committee and the 1964 Helsinki Declaration and its subsequent changes or comparable ethical standards. Informed voluntary consent was obtained from each participant included in the study. The study was approved by the Ethics Commission of the V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute FEBRAS (protocol No. 17 of 04/07/2021).

**For citation:** Kushnerova N.F., Momot T.V., Rakhmanin Yu.A., Ryzhova I.N., Fomenko S.E., Sprygin V.G. Ethnic differences in lipid composition and physiological characteristics of erythrocytes in the indigenous and alien populations of Russia north areas. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 956–964. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-956-964> <https://elibrary.ru/stxxdv> (In Russ.)

**For correspondence:** Natalia F. Kushnerova, e-mail: [natasha50@mail.ru](mailto:natasha50@mail.ru)

**Contribution:** Kushnerova N.F. — the concept and design of the study, writing a text; Momot T.V. — the concept and design of the study, collection material; Rakhmanin Yu.A. — editing; Ryzhova I.N. — collection of literature data; Fomenko S.E., Sprygin V.G. — collection material, statistical processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ilyichev Pacific Oceanological Institute on the topic «Ecological and biogeochemical processes in ecosystems of the Far Eastern seas». State registration number 124022100077-0.

Received: October 1, 2025 / Revised: October 13, 2025 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Для освоения природных ресурсов северных территорий Российской Федерации (Чукотский АО, Эвенкийский АО, Приамурье, Ханты-Мансийский АО и др.) необходимо привлечение трудовых мигрантов. При этом экстремальные климатогеографические факторы влияют на метаболические реакции организма пришлого населения, а коренные жители имеют эволюционно обусловленную биохимическую адаптацию к климату северных территорий. Одной из особенностей адаптации является питание, преимущественно состоящее из белков и жиров (морская рыба, мясо диких и морских животных), необходимых для получения значительного количества энергии. Имеющиеся в литературе данные о метаболических реакциях организма коренных народностей Севера (чукчи, эвены и др.) немногочисленны. Известно, что в сыворотке крови этих народностей повы-

шено содержание жирных кислот и холестерина [1], что является физиологической адаптацией к «северному» стрессу, то есть генетически детерминированным процессом [2]. Высокий уровень энергетического обмена требует значительного потребления липидов. Это обусловило активацию липидного метаболического пути [3]. Липиды (фосфолипиды, жирные кислоты и холестерин) играют регуляторную роль в адаптации к низким температурам за счёт изменения вязкости клеточных мембран [4–6].

У коренных жителей Чукотки отмечается более высокое по сравнению с представителями пришлой популяции содержание холестерина липопротеинов высокой плотности (ХС ЛПВП), что соотносится с выраженным риском болезней системы кровообращения, и повышенный уровень полиненасыщенных жирных кислот семейства n-3 в сыворотке крови [7]. У коренных эвенков (Эвенкийский АО) отмечалось снижение уровня холестерина липопротеинов низкой

плотности (ХС ЛПНП) и триацилглицеринов [8]. Аналогичные изменения липидного обмена отмечены у коренных жителей Магаданской области (эвены, коряки) [1], Приамурья (нанайцы, улчи, эвены) [9], Ханты-Мансийского АО (ханты) [10], Якутии (якуты, эвенки) [11, 12]. Так, у аборигенов Приамурья значение коэффициента атерогенности было на 42% ниже по сравнению с мигрантами, а содержание общего холестерина составляло менее 5,2 ммоль/л. Высокая активность ферментов гамма-глутамин-транспептидазы, аланинаминотрансферазы и щелочной фосфатазы у коренной популяции по сравнению с пришлой сочеталась с более низким уровнем глюкозы. Это влияет на биоэнергетику организма, так как позволяет липидам более интенсивно поступать и проходить по метаболическим путям. Повышенная активность лактатдегидрогеназы свидетельствует о приспособленности организма коренных жителей к гипоксии [9].

При анализе биохимических показателей крови у лиц пришлой популяции Якутии отмечался повышенный по сравнению с коренными жителями уровень общего холестерина (ОХС) и атерогенной фракции ХС ЛПНП, причем наиболее высокие значения ОХС отмечались в первый год жизни в условиях Севера. По мнению авторов, это отражает снижение приспособительных реакций организма, что ведёт к формированию различных патологий [12]. У коренных пожилых (60–69 лет) жителей Якутска в крови было выше значение ХС ЛПВП, а значения ОХС, ХС ЛПНП и индекса атерогенности (ИА) оказались ниже по сравнению с показателями пришлых жителей. В то же время у коренных якутов урбанизация Севера нарушает механизм адаптации к экстремальным климатогеографическим факторам, что сопровождается развитием ожирения, сахарного диабета и метаболического синдрома [13].

При исследовании биохимических показателей крови у лиц коренного населения (коряки, эвены) Магаданской области и их сравнении с таковыми у мигрантов отмечался более низкий уровень ОХС, триацилглицеринов (ТАГ), ХС ЛПНП и коэффициента атерогенности, тогда как у пришлых лиц эти величины были статистически достоверно выше, чем у коренных [1]. В условиях гипотермии у пришлых жителей усиливается основной обмен веществ за счёт жирового компонента питания, что приводит к повышению уровня свободных жирных кислот (СЖК) и ХС, обуславливающих дислипидемию [8]. У пришлых жителей Чукотки отмечалась аналогичная направленность изменений липидного профиля крови по сравнению с таковым у коренных жителей (чукчи) [14]. Так, у чукчей в сыворотке крови было снижено содержание общего холестерина, липопротеинов низкой плотности, триацилглицеринов при повышенном уровне полиненасыщенных жирных кислот семейства n-3 (линоленовой, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой) [15].

Этнические различия в уровнях сывороточных липидов обнаружены и у жителей г. Аннистона штата Алабама (афроамериканцы и латиноамериканцы). У афроамериканцев отмечались более низкие величины ОХС, ХС ЛПНП, ТАГ и более высокие уровни ХС ЛПВП по сравнению с таковыми у латиноамериканцев [16]. По мнению авторов, в этих различиях играют важную роль генетические факторы. При этом у афроамериканцев выше уровни активности липопротеинлипазы, что обеспечивает снижение уровня ТАГ, тогда как для латиноамериканцев характерна высокая активность печёночной липазы, снижающей уровень ХС ЛПВП [17].

В рамках исследования крови жителей Северного Манхэттена, где испаноязычные являются самым быстрорастущим сегментом населения, также была выявлена дислипидемия, характеризующаяся низким уровнем ХС ЛПВП и высоким ОХС, ТАГ и ХС ЛПНП. Однако при таких значениях липидных показателей авторы отмечали снижение смертности от ишемической болезни сердца, что было названо «испаноязычным парадоксом» [18].

На основании вышеизложенного следует отметить, что у аборигенов Севера сформировался «северный» метаболический тип как наиболее энергетически экономный,

при котором происходит переключение углеводного пути получения энергии, характерного для европеоидов, на липидный [3, 19]. При этом отмечается сдвиг липопротеинового спектра в сторону образования ЛПВП. Значения атерогенных липидов крови у коренных жителей значительно ниже, чем у пришлых европеоидов, у которых присутствует риск формирования ИБС на фоне выраженной дислипидемии. Многие исследователи связывают это с адаптацией к особенностям питания коренных жителей, у которых преобладает жирная пища. Так как углеводная пища (фрукты, овощи, зелень и др.), типичная для европеоидов, в северных районах менее доступна, происходит смена характера питания, что активизирует обмен липидов.

Данные о состоянии обмена веществ у людей разных этнических групп, населяющих территорию России, разрозненны и, как правило, касаются отдельных биохимических показателей. Это не позволяет составить целостную картину метаболизма в целом. Известно, что существуют группы людей с риском возникновения тех или иных болезней. В частности, у представителей монголоидной расы (чукчи, эвены, эскимосы, удэгейцы, корейцы, китайцы, японцы и др.) отмечается быстрое по сравнению с европеоидами формирование симптомов алкоголизма и протекание болезни тяжело и злокачественно [20]. В числе причин интолерантности к алкоголю у монголоидов — генетически обусловленная структурная организация альдегиддегидрогеназы, а также «атипичная» алкогольдегидрогеназа, встречающаяся у 85–90% представителей этих народностей [21]. В настоящее время подробно изучаются адаптивные реакции организма европеоидов, тогда как метаболические реакции у коренного населения Севера исследованы недостаточно. Некоторые из изученных нами биохимических параметров липидного состава мембран эритроцитов в доступной литературе не отражены. В связи с этим был исследован липидный состав мембран эритроцитов у представителей коренного и пришлого населения Чукотки, проживающих в одном населённом пункте.

*Цель исследования* — изучить физиологические характеристики эритроцитов и липидный состав их мембран у представителей двух этнических групп.

## Материалы и методы

Проведено исследование биохимических параметров мембран эритроцитов здоровых мужчин 20–30 лет, проживающих в пос. Ола Магаданской области, проходящих плановый медицинский осмотр в районной больнице. Обследованы 20 мужчин пришлой популяции (европеоиды) и 20 мужчин коренной популяции чукчей (монголоиды). В группу пришлой популяции входили мужчины, проживающие в условиях Севера не более двух лет, что, по данным литературы, свидетельствует о незавершённой адаптации и сохранении метаболизма, характерного для европеоидов [12]. У обследуемых исключался приём спиртных напитков за две недели до обследования. На момент обследования уровень этанола в крови не превышал эндогенного. Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствуют этическим стандартам Национального комитета по исследовательской этике и Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации 1964 г. и её последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включённых в исследование участников было получено информированное добровольное согласие. Исследование было одобрено Комиссией по вопросам этики Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (протокол № 17 от 07.04.2021 г.).

Кровь для биохимического исследования отбирали из локтевой вены в утренние часы натощак в вакуумные пробирки с зелёной крышкой Vacuette. Плазму крови и эритроцитарную массу получали общепринятым методом центрифугирования. Для определения среднего объёма и среднего диаметра эритроцитов использовали автоматический гематологический анализатор Abacus (Diatron, Австрия).

Таблица 1 / Table 1

**Физиологические показатели эритроцитов здоровых людей пришлой и коренной популяций,  $M \pm m$** **Physiological parameters of erythrocytes in healthy persons of alien and indigenous populations,  $M \pm m$** 

| Показатель<br>Indices                                                                                             | Пришлая популяция<br>Alien population | Коренная популяция<br>Indigenous population |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Средний диаметр эритроцитов (СДЭ, мкм)   The average diameter of red blood cells (ADRbc, microns)                 | $7.37 \pm 0.11$                       | $7.80 \pm 0.13^*$                           |
| Средний объём эритроцитов (СОЭр, мкм <sup>3</sup> )   Average volume of red blood cells (AVRbc, $\mu\text{m}^3$ ) | $80.06 \pm 3.3$                       | $94.91 \pm 3.8^{**}$                        |
| Осмотическая резистентность (% NaCl)   Osmotic resistance (% NaCl)                                                | $0.45 \pm 0.01$<br>$0.35 \pm 0.01$    | $0.40 \pm 0.02^*$<br>$0.30 \pm 0.01^*$      |

Примечание. Здесь и в табл. 2–4: различия статистически достоверны по сравнению с пришлой популяцией при: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ .

Note: Here and in Tables 2–4: The differences are statistically significant for comparison to the alien population: \* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$ .

Осмотическую резистентность оценивали методом определения устойчивости эритроцитов к изменению концентрации NaCl [22]. Для получения мембранной массы эритроциты вносили в дистиллированную воду, где происходил их полный гемолиз. Полученную мембранную массу трижды отмывали охлаждённым до температуры плюс 4 °C изотоническим раствором NaCl с последующим центрифугированием, каждый раз удаляя надосадочную жидкость [23]. Экстракты общих липидов из мембран эритроцитов выделяли по методу Фольча [24]. Суспензию силикагеля марки «КСК» (ООО «Лабхимос», Россия) и пластинки размером 6 × 6 см для двумерной микротонкослойной хроматографии (ТСХ) фосфолипидов и нейтральных липидов готовили по методу В.И. Светашева и В.Е. Васьковского [25]. Для разделения фосфолипидов на фракции использовали системы растворителей, описанные Роузером и соавт. [26]: в первом направлении – смесь хлороформа с метанолом и 28%-м аммиаком в соотношении 65 : 25 : 5 (по объёму), во втором – смесь хлороформа с ацетоном, метанолом, ледяной уксусной кислотой и водой в соотношении 50 : 20 : 10 : 10 : 5 (по объёму). Для обнаружения холинсодержащих фосфолипидов (фосфатидилхолин, лизофосфатидилхолин, сфингомиелин) использовали реактив Драгендорфа [27]: липиды проявлялись в виде оранжевых пятен на жёлтом фоне. Для обнаружения фосфолипидов, содержащих аминогруппу (фосфатидилэтаноламин, лизофосфатидилэтаноламин, фосфатидилсерин), пластинки опрыскивали 5%-м раствором нингидрина в ацетоне с последующим нагреванием в течение 2–3 мин над парами воды до появления розовых пятен на белом фоне [26]. Фосфолипиды, содержащие гидроксильные группы (фосфатидилинозит), обнаруживали с помощью периодатного реактива Шиффа [27], пятна липидов имели розово-сиреневый цвет. Для проявления всех фосфолипидных фракций применяли молибдатный реактив [28]. Липиды проявлялись в виде синих пятен на белом фоне. Для количественного определения каждой фракции использовали 10%-й раствор серной кислоты в метаноле с последующим нагреванием пластинок на закрытой электрической плите.

Количество общих фосфолипидов и отдельных фракций фосфолипидов рассчитывали по методу В.Е. Васьковского и соавт. [28] с принятым алгоритмом количественного определения. Разделение нейтральных липидов для выделения фракции холестерина в липидном экстракте из мембран эритроцитов осуществляли методом одномерной ТСХ на силикагеле в системе растворителей «гексан + серный эфир + уксусная кислота» в соотношении 90 : 10 : 1 (по объёму) [29]. Для идентификации пятен нейтральных липидов использовали очищенные препараты отечественного производства («Реахим», Россия). Количественное определение пятен липидов после хроматографирования выполняли парами йода. Расчёт величин отдельных фракций нейтральных липидов и фосфолипидов выражали в процентах от их общей суммы.

Определение жирнокислотного состава липидного экстракта мембран эритроцитов проводили методом газо-жид-

костной хроматографии (ГЖХ). Метилловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) получали при использовании метода переэтерификации липидов [30] и далее очищали с помощью ТСХ, используя систему «гексан + диэтиловый эфир» в соотношении 95 : 5 (по объёму). МЭЖК анализировали на газовом хроматографе «ЛХМ-2000» (ОАО «Хроматограф», Россия) с пламенно-ионизационным детектором, капиллярной колонкой HP-5-MS с 5%-м фенилметилсилоксаном (30 м × 0,25 мм, Agilent, США). Газ-носитель – гелий, температура инжектора – плюс 180 °C. Идентификацию МЭЖК проводили сравнением времени удерживания и сравнением с известными стандартами [31]. Результаты выражали в процентах от суммы жирных кислот.

Количественные данные обрабатывали с использованием статистического пакета Instat 3,0 (GraphPad. Software Inc. USA, 2005) со встроенной процедурой проверки соответствия выборки закону нормального распределения. Полученные количественные данные выражали как среднее значение ± стандартная ошибка. Статистическую значимость различий при межгрупповых сравнениях определяли с использованием непараметрического *U*-критерия Манна – Уитни и параметрического *t*-критерия Стьюдента. Различия считали статистически достоверными при значении  $p < 0,05$ .

## Результаты

Как видно из табл. 1, у лиц коренной популяции величины среднего диаметра (СДЭ) и среднего объёма эритроцитов (СОЭр) были выше на 6% ( $p < 0,05$ ) и 19% ( $p < 0,01$ ) соответственно по сравнению с таковыми значениями у лиц пришлой популяции.

Гемолиз эритроцитов коренного населения при внесении их в растворы NaCl от 0,8 до 0,3% начинался при концентрации  $0,4 \pm 0,02\%$  NaCl, то есть позже, чем у пришлох лиц ( $0,45 \pm 0,01\%$  NaCl). Завершение гемолиза также происходило позже ( $0,3 \pm 0,01\%$  NaCl против  $0,35 \pm 0,01\%$  NaCl) у пришлох лиц, что указывает на повышенную устойчивость мембран эритроцитов у коренных жителей к гемолизирующему воздействию.

В мембранах эритроцитов отмечались этнические различия в величинах общих фосфолипидов, фосфолипидных фракций и холестерина (табл. 2).

Содержание общих фосфолипидов (ОФЛ) в мембране эритроцитов у коренных жителей было выше на 9% ( $p < 0,05$ ), тогда как уровень холестерина (ХС) – ниже на 9% ( $p < 0,05$ ), чем эти же показатели у пришлох. В связи с этим коэффициент ХС/ОФЛ у коренных жителей был на 18% ( $p < 0,01$ ) ниже, чем у пришлох. Величина фосфатидилхолина (ФХ) у коренных была ниже таковой у пришлох на 30% ( $p < 0,001$ ), тогда как значение фосфатидилэтаноламина (ФЭ) – выше на 20% ( $p < 0,01$ ). Одновременно отмечалось увеличение лизофосфатидилхолина (ЛФХ) на 18% ( $p < 0,01$ ) и лизофосфатидилэтаноламина (ЛФЭ) на 7% ( $p < 0,05$ ). Это явление обусловлено активацией фосфолипазы A<sub>2</sub> [32]. Следует отметить

Таблица 2 / Table 2

**Содержание липидных фракций в общих липидах мембран эритроцитов здоровых людей пришло и коренной популяций (% от суммы всех фракций)****The content of lipid fractions in the total lipids of erythrocyte membranes in healthy people of alien and indigenous populations (in % of the sum of all fractions)**

| Фракции липидов<br>Lipid fractions                                               | Пришлая популяция<br>Alien population | Коренная популяция<br>Indigenous population |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Общие фосфолипиды (% от общих липидов)   Total phospholipids (% of total lipids) | 65 ± 2                                | 71 ± 2*                                     |
| Холестерин (% от общих липидов)   Cholesterol (% of total lipids)                | 24.5 ± 0.8                            | 22.3 ± 0.5*                                 |
| Холестерин/фосфолипиды (ХС/ФЛ)   Cholesterol/phospholipids (C/PL)                | 0.38 ± 0.02                           | 0.31 ± 0.01**                               |
| Фосфатидилхолин (ФХ)   Phosphatidylcholine (PC)                                  | 35.34 ± 1.13                          | 24.85 ± 1.62***                             |
| Лизофосфатидилхолин (ЛФХ)   Lysophosphatidylcholine (LPC)                        | 2.75 ± 0.15                           | 3.24 ± 0.17**                               |
| Сфингомиелин (СМ)   Sphingomyelin (SM)                                           | 20.37 ± 1.13                          | 24.26 ± 1.09*                               |
| Фосфатидилэтанолламин (ФЭ)   Phosphatidylethanolamine (PE)                       | 20.05 ± 0.96                          | 24.08 ± 0.86**                              |
| Лизофосфатидилэтанолламин (ЛФЭ)   Lysophosphatidylethanolamine (LPE)             | 1.48 ± 0.03                           | 1.59 ± 0.04*                                |
| Фосфатидилсерин (ФС)   Phosphatidylserine (PS)                                   | 10.20 ± 0.23                          | 11.22 ± 0.24**                              |
| Фосфатидилинозит (ФИ)   Phosphatidylinositol (PI)                                | 6.41 ± 0.17                           | 7.18 ± 0.12**                               |
| Фосфатидная кислота (ФК)   Phosphatidic acid (FA)                                | 2.92 ± 0.13                           | 4.06 ± 0.17***                              |
| СМ/ФХ   SM/PC                                                                    | 0.58 ± 0.06                           | 0.98 ± 0.07***                              |
| (ФЭ + ФС) / (ФХ + СМ)   (PE + PS) / (PC + SM)                                    | 0.54 ± 0.07                           | 1.38 ± 0.12***                              |
| ФК + ФС + ФЭ + ФИ) / (ФХ + СМ)   (PA + PS + PE + PI) / (PC + SM)                 | 0.71 ± 0.08                           | 1.11 ± 0.11**                               |

повышенный уровень сфингомиелина (СМ) на 19% ( $p < 0,05$ ) у коренных жителей, что является компенсаторной реакцией на снижение уровня ФХ [33]. Значения фосфатидилсерина (ФС), фосфатидилинозита (ФИ) и фосфатидной кислоты (ФК) были выше на 10; 12 и 39% ( $p < 0,01-0,001$ ) соответственно. Такие изменения величин метаболически активных фракций фосфолипидов (ФС, ФИ и ФК) могут оказывать влияние на активность мембраносвязанной  $\text{Na}^+, \text{K}^+$ -АТФ-азы [34]. Известно, что ФИ входит в состав внутреннего моно-слоя биомембраны, а для этой фракции характерна высокая

скорость обмена, что необходимо для адаптации к изменившимся условиям среды [35].

При анализе показателей жирных кислот в общих липидах эритроцитарных мембран важно отметить, что у лиц коренной популяции выявлены более высокие уровни полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) семейства n-3, тогда как у пришлых преобладали ПНЖК семейства n-6 (табл. 3).

В результате соотношение n-3/n-6 у коренных жителей было на 9% ( $p < 0,05$ ) выше, чем у пришлых. Сумма насыщенных жирных кислот у коренных также была выше на 8%

Таблица 3 / Table 3

**Содержание основных видов жирных кислот в общих липидах мембран эритроцитов здоровых людей пришло и коренной популяций (% от суммы всех жирных кислот)****The content of the main types of fatty acids in the total lipids of erythrocyte membranes in healthy persons of alien and indigenous populations (in % of the sum of all fatty acids)**

| Жирные кислоты<br>Fatty acids                                               | Пришлая популяция<br>Alien population | Коренная популяция<br>Indigenous population |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Миристиновая кислота (14 : 0)   Myristic acid (14 : 0)                      | 1.37 ± 0.06                           | 1.49 ± 0.02                                 |
| Пальмитиновая кислота (16 : 0)   Palmitic acid (16 : 0)                     | 27.84 ± 0.65                          | 30.04 ± 0.71*                               |
| Пальмитолеиновая кислота (16 : 1) n-9   Palmitoleic acid (16 : 1) n-9       | 3.48 ± 0.16                           | 3.97 ± 0.12*                                |
| Стеариновая кислота (18 : 0)   Stearic acid (18 : 0)                        | 12.61 ± 0.33                          | 13.72 ± 0.36*                               |
| Олеиновая кислота (18 : 1) n-9   Oleic acid (18 : 1) n-9                    | 16.33 ± 0.71                          | 11.67 ± 0.62***                             |
| Линолевая кислота (18 : 2) n-6   Linoleic acid (18 : 2) n-6                 | 14.87 ± 0.64                          | 14.91 ± 0.69                                |
| Линоленовая кислота (18 : 3) n-3   Linolenic acid (18 : 3) n-3              | 1.55 ± 0.07                           | 1.76 ± 0.03                                 |
| Арахидоновая кислота (20 : 4) n-6   Arachidonic acid (20 : 4) n-6           | 9.52 ± 0.37                           | 9.26 ± 0.30                                 |
| Эйкозапентаеновая кислота (20 : 5) n-3   Eicosapentaenoic acid (20 : 5) n-3 | 6.55 ± 0.13                           | 6.73 ± 0.15                                 |
| Докозагексаеновая кислота (22 : 6) n-3   Docosahexaenoic acid (22 : 6) n-3  | 5.88 ± 0.17                           | 6.45 ± 0.14*                                |
| n-3 ПНЖК   n-3 PUFA                                                         | 13.98 ± 0.33                          | 14.94 ± 0.30*                               |
| n-6 ПНЖК   n-6 PUFA                                                         | 24.39 ± 0.57                          | 24.17 ± 1.51                                |
| n-3/n-6                                                                     | 0.57 ± 0.01                           | 0.62 ± 0.02*                                |
| 20 : 4 n-6/18 : 2 n-6                                                       | 0.64 ± 0.01                           | 0.60 ± 0.01**                               |
| 20 : 4 n-6/20 : 5 n-3                                                       | 1.45 ± 0.01                           | 1.48 ± 0.01*                                |

Примечание. Здесь и в табл. 4: различия статистически достоверны при: \*\*\* —  $p < 0,001$  по сравнению с пришлой популяцией.

Note: Here and in Table 4: The differences are statistically significant at: \*\*\* —  $p < 0.001$  when compared to the alien population.

Таблица 4 / Table 4

Содержание основных видов жирных кислот в фосфатидилхолине и фосфатидилэтаноламине мембран эритроцитов здоровых людей пришло и коренной популяций (% от суммы всех жирных кислот)

The content of the main types of fatty acids in phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine of erythrocyte membranes in healthy people of alien and indigenous populations (in % of the sum of all fatty acids)

| Жирные кислоты<br>Fatty acids                                                | Фосфатидилхолин<br>Phosphatidylcholine |                                             | Фосфатидилэтаноламин<br>Phosphatidylethanolamine |                                             |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                                                              | Пришлая популяция<br>Alien population  | Коренная популяция<br>Indigenous population | Пришлая популяция<br>Alien population            | Коренная популяция<br>Indigenous population |
| Миристиновая кислота (14 : 0)   Myristic acid (14 : 0)                       | 1.13 ± 0.12                            | 1.46 ± 0.07*                                | 1.27 ± 0.13                                      | 1.83 ± 0.11**                               |
| Пальмитиновая кислота (16 : 0)   Palmitic acid (16 : 0)                      | 28.87 ± 0.38                           | 30.21 ± 0.32*                               | 20.47 ± 0.67                                     | 21.00 ± 0.73                                |
| Пальмитолеиновая кислота (16 : 1) n-9<br>Palmitoleic acid (16 : 1) n-9       | 1.88 ± 0.04                            | 2.07 ± 0.06**                               | 4.98 ± 0.19                                      | 4.92 ± 0.16                                 |
| Стеариновая кислота (18 : 0)   Stearic acid (18 : 0)                         | 13.00 ± 0.30                           | 14.00 ± 0.33*                               | 18.62 ± 0.60                                     | 19.00 ± 0.55                                |
| Олеиновая кислота (18 : 1) n-9   Oleic acid (18 : 1) n-9                     | 19.93 ± 0.68                           | 15.21 ± 0.63***                             | 19.10 ± 0.57                                     | 17.34 ± 0.49*                               |
| Линолевая кислота (18 : 2) n-6   Linoleic acid (18 : 2) n-6                  | 14.83 ± 0.36                           | 13.40 ± 0.32                                | 11.63 ± 0.42                                     | 9.2 ± 0.27***                               |
| Линоленовая кислота (18 : 3) n-3   Linolenic acid (18 : 3) n-3               | 1.28 ± 0.12                            | 3.59 ± 0.62***                              | 3.12 ± 0.11                                      | 4.40 ± 0.21***                              |
| Арахидоновая кислота (20 : 4) n-6   Arachidonic acid (20 : 4) n-6            | 10.40 ± 0.28                           | 10.38 ± 0.24*                               | 9.52 ± 0.37                                      | 10.00 ± 0.35                                |
| Эйкозапентаеновая кислота (20 : 5) n-3<br>Eicosapentaenoic acid (20 : 5) n-3 | 6.14 ± 0.10                            | 6.28 ± 0.27***                              | 6.80 ± 0.47                                      | 6.94 ± 0.43                                 |
| Докозагексаеновая кислота (22 : 6) n-3<br>Docosahexaenoic acid (22 : 6) n-3  | 2.54 ± 0.14                            | 3.40 ± 0.14***                              | 4.49 ± 0.17                                      | 5.35 ± 0.20**                               |
| n-3 ПНЖК   n-3 PUFA                                                          | 9.96 ± 0.52                            | 13.27 ± 0.77**                              | 9.92 ± 0.65                                      | 16.69 ± 0.73***                             |
| n-6 ПНЖК   n-6 PUFA                                                          | 25.23 ± 0.54                           | 24.78 ± 0.45                                | 21.15 ± 0.57                                     | 19.22 ± 0.48*                               |
| n-3/n-6 ПНЖК   n-3/n-6 PUFA                                                  | 0.39 ± 0.01                            | 0.54 ± 0.03***                              | 0.47 ± 0.02                                      | 0.87 ± 0.05***                              |
| 20 : 4 n-6/18 : 2 n-6                                                        | 0.70 ± 0.01                            | 0.72 ± 0.01                                 | 0.82 ± 0.08                                      | 1.08 ± 0.07*                                |
| 20 : 4 n-6/20 : 5 n-3                                                        | 1.64 ± 0.02                            | 1.65 ± 0.02                                 | 1.40 ± 0.01                                      | 1.44 ± 0.01**                               |

(45,25 ± 0,6% против 41,82 ± 0,56% у пришлых;  $p < 0,001$ ) за счёт роста пальмитиновой и стеариновой кислот в среднем на 8–9% ( $p < 0,05$ ), что определяет высокую активность синтеза жирных кислот, характерного для «северного» типа метаболизма.

Анализ спектров жирных кислот основных структурных фосфолипидов мембран эритроцитов (фосфатидилхолин и фосфатидилэтаноламин) у лиц двух этнических групп показал достоверные различия (табл. 4).

Так, у коренных жителей в составе ФХ возросла сумма насыщенных жирных кислот до 45,67 ± 0,68%, а у пришлых — до 43 ± 0,57% ( $p < 0,001$ ) в результате повышения уровней миристиновой (на 29%;  $p < 0,05$ ), пальмитиновой (на 5%;  $p < 0,05$ ) и стеариновой (на 8%;  $p < 0,05$ ) жирных кислот. В ряду ПНЖК семейства n-3 величина линоленовой кислоты превышала таковой уровень у коренных жителей в 2,8 раза ( $p < 0,001$ ), а докозагексаеновой кислоты — на 34% ( $p < 0,001$ ).

В спектре жирных кислот ФЭ эритроцитарных мембран лиц коренной популяции сумма насыщенных жирных кислот составляла 41,83 ± 0,6%, а у пришлых — 40,36 ± 0,58% за счёт более высокого уровня миристиновой кислоты (в 2 раза;  $p < 0,001$ ). В ряду ПНЖК семейства n-6 отмечалось снижение линолевой кислоты на 44% ( $p < 0,001$ ). В то же время в ряду ПНЖК семейства n-3 следует отметить повышение линоленовой кислоты на 41% ( $p < 0,001$ ) и докозагексаеновой кислоты на 19% ( $p < 0,001$ ).

Из вышеизложенного следует, что этнические особенности липидной составляющей мембран эритроцитов характеризовались различиями как в величинах фосфолипидных фракций и жирных кислот в составе общих липидов мембран, так и в величинах жирных кислот их основных структурных единиц (ФХ и ФЭ), что, возможно, обусловило различия в физиологических характеристиках эритроцитов и их устойчивости к гемолизирующему воздействию.

## Обсуждение

Результаты исследования показали, что величины физиологических показателей эритроцитов, а также значения липидных составляющих их мембран имели статистически значимые различия в зависимости от этнической принадлежности обследуемых лиц. Этнические различия в физиологических характеристиках эритроцитов проявлялись в увеличении среднего диаметра и среднего объёма эритроцитов у лиц коренной популяции по сравнению с пришлой. По-видимому, это связано с повышенным потреблением кислорода при холодовом воздействии, увеличении концентрации гемоглобина в эритроцитах, что влияет на их размеры [36]. Длительное воздействие низкой температуры на организм человека приводит к адаптивной перестройке всех регуляторных систем, в том числе наблюдается изменение мембранных липидов [37].

Снижение значения ХС/ФЛ, а также увеличение соотношения СМ/ФХ (наружный монослой бислоевой мембраны) у коренных жителей обусловило рост осмотической устойчивости к гемолизирующему воздействию, так как известно, что СМ в мембране эритроцитов является стабилизатором, а соотношение СМ/ФХ влияет на осмотическую устойчивость эритроцитов [38]. Кроме того, увеличение соотношения СМ/ФХ также повышает термостабильность эритроцитов и длительность их циркуляции в кровяном русле [39]. Замена ФХ на СМ в наружном монослое липидного бислоя, по-видимому, является защитно-приспособительной реакцией не только на снижение уровня ФХ, но, возможно, и на пребывание в условиях гипотермии. В состав СМ преимущественно входят насыщенные жирные кислоты, и эта фракция менее подвержена перекисидации, что очень важно при наличии высоких концентраций гемоглобина, являющегося пусковым механизмом в окислительных процессах.

Модификация фосфолипидного матрикса затронула и внутренний монослой мембранного бислоя эритроцитов, что подтверждает их структурно-функциональные изменения. Отмечалось увеличение коэффициента асимметрии ФЭ + ФС/ФХ + СМ (отношение суммы фосфолипидов с меньшей насыщенностью к сумме фосфолипидов с большей насыщенностью) у лиц коренной популяции. Увеличение отношения легкоокисляемых фосфолипидов к трудноокисляемым фосфолипидам (ФК + ФС + ФЭ + ФИ)/(ФХ + СМ) свидетельствует об уменьшении жёсткости мембраны [40]. Следует отметить, что рост величин метаболически активных фракций (ФС, ФИ, ФК), которые необходимы для функционирования мембраносвязанных ферментов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -АТФ-аза, кальцийзависимая АТФаза, ферменты дыхательной цепи митохондрий и др.), способствует активации транспортной функции и энергетического обмена [40]. Кроме того, высокий уровень ФК в мембране эритроцитов лиц коренной популяции (на 39% больше) согласуется со снижением уровня ФХ, при синтезе которого используется этот фосфолипид.

Анализ жирнокислотных спектров общих липидов и структурных фосфолипидов мембран эритроцитов — ФХ и ФЭ также выявил этнические различия. Если у лиц пришлой популяции среди ПНЖК в общих липидах мембран эритроцитов преобладали жирные кислоты семейства n-6, то у лиц коренной популяции преобладали жирные кислоты семейства n-3. Таким образом, у коренных жителей действует адаптивно-компенсаторный механизм, который способствует поддержанию ненасыщенности мембранных фосфолипидов за счёт ПНЖК семейства n-3 [41]. При этом соотношение жирных кислот n-3/n-6 в общих липидах у коренных жителей было выше, чем у пришлых. Эти изменения являются результатом активации ферментов десатураз и элонгаз, которые участвуют в процессах синтеза ПНЖК. Расчёт коэффициентов соотношения величин жирных кислот дал возможность охарактеризовать активность этих ферментов. Так, уменьшение величины  $20 : 4 \text{ n-6}/18 : 2 \text{ n-3}$  в общих липидах мембран эритроцитов коренных жителей показывает снижение активного метаболизма n-6 ПНЖК, так как это соотношение характеризует  $\Delta 6$ -десатуразу. В то же время увеличение соотношения  $20 : 4 \text{ n-6}/20 : 5 \text{ n-3}$  в общих липидах мембран эритроцитов этой группы лиц повышает метаболизм n-3 ПНЖК, так как это соотношение характеризует  $\Delta 5$ -десатуразу [42].

При исследовании жирнокислотных спектров основных структурных фосфолипидов мембран эритроцитов (ФХ и ФЭ) отмечены аналогичные этнические различия, как и в общих липидах. У коренных жителей в составе ФХ сумма насыщенных жирных кислот и сумма n-3 ПНЖК были выше, чем у пришлых, тогда как сумма n-6 ПНЖК была ниже. В результате соотношение n-3/n-6 у коренных превышало таковую величину у пришлых. В составе жирных кислот ФЭ мембран эритроцитов также прослеживались этнические различия. Сумма насыщенных жирных кислот у коренных жителей имела тенденцию к увеличению, при этом сумма ПНЖК n-3 была выше, а сумма ПНЖК n-6 была ниже, чем у пришлых. В результате соотношение

ПНЖК n-3/n-6 у коренных достоверно превышало таковую величину у пришлых. По-видимому, это обусловлено типом питания: в пище преобладают ПНЖК n-3 над ПНЖК n-6, так как преобладание n-3-десатуразной активности регулируется количеством субстрата [41]. Это согласуется с увеличением содержания докозагексаеновой кислоты ( $22 : 6 \text{ n-3}$ ), что связано с ростом доли её предшественника —  $\alpha$ -линоленовой кислоты ( $18 : 3 \text{ n-3}$ ).

Таким образом, проживание в условиях гипотермии и питание преимущественно продуктами морского промысла, содержащими в своём составе ПНЖК семейства n-3, оказывает влияние на количественные характеристики фосфолипидов и их жирных кислот в мембране эритроцитов. Увеличение ненасыщенности жирных кислот как во внешнем, так и внутреннем монослоях мембран эритроцитов (маркёры — ФХ и ФЭ) свидетельствует об их структурных изменениях, которые отражаются на функциональных свойствах (увеличение размеров и повышение устойчивости к гемолизу), формирующихся в процессе адаптации к гипотермии.

**Ограничения исследования.** Исследование ограничено числом обследованных лиц, проходивших плановый медицинский осмотр в районной больнице.

## Заключение

На основании системного биохимического анализа, характеризующего липидную составляющую мембран эритроцитов, их размеры и осмотическую устойчивость к гемолизирующему воздействию, были получены данные об этнических особенностях метаболических реакций у двух этнических групп (коренная популяция и пришлая популяция), проживающих на северных территориях Российской Федерации. У лиц коренной популяции по сравнению с исследованными показателями у лиц пришлой популяции отмечалось увеличение размерных характеристик эритроцитов. Также выявлены различия в фосфолипидном составе их мембран, которые характеризовались снижением величин ФХ и заменой его на СМ, увеличением ФЭ и метаболически активных ФС, ФИ и ФК. В жирнокислотном составе липидов мембран эритроцитов различия характеризовались более высоким уровнем ПНЖК n-3 в составе общих липидов и в составе основных структурных фосфолипидов мембран (ФХ и ФЭ) у лиц коренной популяции, что также является этнической особенностью. Различия в составе ПНЖК в структурах ФХ и ФЭ предполагают появление модифицированных молекулярных видов этих фракций у лиц коренной популяции. По-видимому, этнические особенности в фосфолипидной составляющей мембран эритроцитов у лиц коренной популяции обуславливают различия в размерных характеристиках эритроцитов и увеличение устойчивости клеток к гемолизирующему воздействию. По нашему мнению, это не отклонение от нормы, а один из вариантов обмена веществ у человека.

Наличие этнических особенностей необходимо учитывать при проведении профилактических мероприятий и назначении необходимой терапии выявленных патологий у групп населения конкретной географической зоны.

## Литература

(п.п. 5, 16–18, 21, 24–26, 28–32, 38–40 см. References)

1. Аверьянова И.В., Максимов А.Л. Состояние липидного и углеводного обмена у студентов-аборигенов и европеоидов с различными сроками проживания на территории Магаданской области. *Экология человека*. 2015; (9): 44–9. <https://doi.org/10.17816/humecol6990> <https://elibrary.ru/wfruyf>
2. Севостьянова Е.В. Особенности липидного и углеводного метаболизма человека на Севере (литературный обзор). *Бюллетень Сибирской медицины*. 2013; 12(1): 93–100. <https://elibrary.ru/qabarp>
3. Панин Л.Е. Человек в экстремальных условиях Арктики. *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2010; 30(3): 92–8. <https://elibrary.ru/mssfvf>
4. Гончарова С.Н., Костецкий Э.Я., Санина Н.М. Влияние сезонных изменений температуры на липидный состав морских макрофитов. *Физиология растений*. 2004; 51(2): 190–6. <https://elibrary.ru/oxnsth>
5. Коломийцева И.К. Липиды в гериатрии и искусственном гипобиозе млекопитающих (обзор). *Биохимия*. 2011; 76(12): 1604–14. <https://elibrary.ru/onowkl>
6. Кушнерова Н.Ф. Сравнительный анализ метаболических реакций здоровых людей пришлой и коренной популяций Севера. В кн.: *Валеология: Диагностика, средства и практика обеспечения здоровья. Сборник научных трудов. Том 3*. Владивосток: Дальнаука; 1996: 196–202. <https://elibrary.ru/xjpppeg>

## Original article

8. Никитин Ю.П., Татаринова О.В., Макаренко К.В. Этнические особенности липидного профиля крови жителей Сибири в возрасте 60–69 лет. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2013; 12(5): 62–7. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2013-5-62-67> <https://elibrary.ru/rflkyt>
9. Рябова Т.И., Попова Т.В. Липидный спектр сыворотки крови у коренного (эвены, нанайцы, ульчи) и пришлого населения Приамурья. *Дальневосточный медицинский журнал*. 2010; (4): 106–8. <https://elibrary.ru/nelsjj>
10. Ефимова Л.П., Кудряшова В.Е. Показатели липидного обмена у аборигенов севера Сибири. *Вестник Санкт-Петербургской медицинской академии им. И.И. Мечникова*. 2009; (1): 66–9. <https://elibrary.ru/nrclor>
11. Воевода М.И., Романова А.Н., Рагина Ю.И., Семаева Е.В. Некоторые особенности факторов риска коронарного атеросклероза у жителей Якутии. *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2010; 30(3): 52–7. <https://elibrary.ru/mssfth>
12. Кривошапкина З.Н., Миронова Г.Е., Семенова Е.И., Олесева Л.Д. Биохимический спектр сыворотки крови как показатель адаптированности жителей Якутии к северным условиям. *Экология человека*. 2015; (11): 19–24. <https://elibrary.ru/uyftnx>
13. Борисова Е.П., Кылбанова Е.С. Показатели липидного профиля у лиц якутской национальности с метаболическим синдромом в сочетании с патологией органов дыхания. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2015; 14(3): 39–42. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2015-3-39-42> <https://elibrary.ru/tzeeqb>
14. Гырголькау Л.А., Щербаклова Л.В., Иванова М.В. Содержание липидов в крови и частота дислипидемии у коренных жителей Чукотки. *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2011; 31(5): 79–83. <https://elibrary.ru/ouymmqb>
15. Кушнерова Н.Ф., Панченко Л.Ф. Этногенетические различия жирнокислотных спектров у больных алкоголизмом. *Вопросы наркологии*. 1993; (4): 34–8. <https://elibrary.ru/dxspwe>
16. Бойко Е.Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере. Екатеринбург; 2005. <https://elibrary.ru/tqogip>
17. Литвякова О.С. Терапевтическая ремиссия алкоголизма у коренного населения Чукотки и ее зависимость от личных характеристик пациента. *Наркология*. 2021; 20(10): 59–68. <https://elibrary.ru/gvyuxa>
18. Меньшиков В.В. *Лабораторные методы исследования в клинике*. М.: Медицина; 1987.
19. Новгородцева Т.П., Эндакова Э.А., Янькова В.И. *Руководство по методам исследования параметров системы «Перекисное окисление липидов – антиоксидантная защита» в биологических жидкостях*. Владивосток; 2003. <https://elibrary.ru/qiftgm>
20. Кейтс М. *Техника липидологии*. Пер. с англ. М.: Мир; 1975.
21. Фоменко С.Е., Кушнерова Н.Ф., Спрыгин В.Г. Эффективность применения липидного экстракта морской зеленой водоросли *Codium fragile* (Suringar) Hariot для репарации мембран эритроцитов мышей при стрессовом воздействии. *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2024; 60(1): 73–84. <https://doi.org/10.31857/S0044452924010067> <https://elibrary.ru/zfmpxc>
22. Альбертс Б., Джонсон А., Льюис Д., Рэфф М., Робертс К., Уолтер П. *Молекулярная биология клетки*. Пер. с англ. М.: Ижевск; 2013.
23. Забелинский С.А., Чеботарева М.А., Шуколюкова Е.П., Кривченко А.И. Фосфолипиды, жирные кислоты и гемоглобин крови крыс в условиях стресса (плавание при низкой температуре). *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2017; 53(1): 16–22. <https://elibrary.ru/yjhboj>
24. Гуринов В.Н., Гуринов А.В. *Терморегуляция и биологически активные вещества крови*. Минск: Бизнесофсет; 2004.
25. Гуринов В.Н. *Обмен липидов при гипотермии, гипертермии и лихорадке*. Минск: Беларусь; 1986.
26. Покровский А.А. Влияние липидов пищи на структуру и функцию биологических мембран. В кн.: *Липиды. Структура, биосинтез, превращения и функции*. М.: Наука; 1977: 118–30.
27. Эндакова Э.А., Новгородцева Т.П., Светашев В.И. *Модификация состава жирных кислот крови при сердечно-сосудистых заболеваниях*. Владивосток: Дальнаука; 2002. <https://elibrary.ru/yyuxgl>

## References

1. Averyanova I.V., Maximov A.L. Lipid and carbohydrate metabolism observed in aboriginal and European students having different terms of residing in territory of Magadan region. *Ekologiya cheloveka*. 2015; (9): 44–9. <https://doi.org/10.17816/humeco16990> <https://elibrary.ru/wfruyt> (in Russian)
2. Sevostyanova Ye.V. Some features of human lipid and carbohydrate metabolism in the North. *Byulleten' Sibirskoi meditsiny*. 2013; 12(1): 93–100. <https://elibrary.ru/qabarp> (in Russian)
3. Panin L.E. Man in extreme conditions in the Arctic. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*. 2010; 30(3): 92–8. <https://elibrary.ru/mssfvp> (in Russian)
4. Goncharova S.N., Kostetsky E.Ya., Sanina N.M. The effect of seasonal shifts in temperature on the lipid composition of marine macrophytes. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2004; 51(2): 169–75. <https://doi.org/10.1023/B:RUPP.0000019209.10747.9d> <https://elibrary.ru/lisncr>
5. Sanina N.M., Goncharova S.N., Kostetsky E.Y. Seasonal changes of fatty acid composition and thermotropic behavior of polar lipids from marine macrophytes. *Phytochemistry*. 2008; 69(7): 1517–27. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.01.014> <https://elibrary.ru/lhjjix>
6. Kolomyitseva I.K. Lipids in mammalian hibernation and artificial hypobiosis. *Biochemistry (Moscow)*. 2011; 76(12): 1291–9. <https://doi.org/10.1134/S00066297911120029> <https://elibrary.ru/perbnj>
7. Kushnerova N.F. Comparative analysis of metabolic reactions of healthy people in come and native populations of North. In: *Valeology: Diagnosis, Remedies and Practice of Health Maintenance. Collection of Scientific Papers. Volume 3 [Valeologiya: Diagnostika, sredstva i praktika obespecheniya zdorov'ya. Sbornik nauchnykh trudov. Tom 3]*. Vladivostok: Dal'nauka; 1996: 196–202. <https://elibrary.ru/xjppge> (in Russian)
8. Nikitin Yu.P., Tatarinova O.V., Makarenkova K.V. Ethnic features of blood lipid profile in Siberians aged 60–69 years. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*. 2013; 12(5): 62–7. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2013-5-62-67> <https://elibrary.ru/rflkyt> (in Russian)
9. Ryabova T.I., Popova T.V. Lipid spectrums in blood serum in the natives population (nanais, ulchis, evens) and new comers of the amur river region. *Dal'nevostochnyi meditsinskii zhurnal*. 2010; (4): 106–8. <https://elibrary.ru/nelsjj> (in Russian)
10. Efimova L.P., Kudryashov V.E. Parameters of lipid metabolism in the native population of Siberia north. *Vestnik Sankt-Peterburgskoi meditsinskoi akademii im. I.I. Mechnikova*. 2009; (1): 66–9. <https://elibrary.ru/nrclor> (in Russian)
11. Voevoda M.I., Romanova A.N., Ragino Yu.I., Semaeva E.V. Some features of coronary atherosclerosis risk factors in the inhabitants of Yakutia. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*. 2010; 30(3): 52–7. <https://elibrary.ru/mssfth> (in Russian)
12. Krivoshepkina Z.N., Mironova G.E., Semyonova E.I., Olesova L.D. Biochemical spectrum of blood serum as indicator of Yakutia residents adaptedness to northern conditions. *Ekologiya cheloveka*. 2015; (11): 19–24. <https://elibrary.ru/uyftnx> (in Russian)
13. Borisova E.P., Kылбанова Е.С. Lipid profile parameters in the persons of Yakut ethnicity with metabolic syndrome comorbid with respiratory pathology. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*. 2015; 14(3): 39–42. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2015-3-39-42> <https://elibrary.ru/tzeeqb> (in Russian)
14. Gyrkol'kau L.A., Shcherbakova L.V., Ivanova M.V. The content of lipids in the blood and the frequency of dyslipoproteinemia in the indigenous inhabitants of Chukotka. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*. 2011; 31(5): 79–83. <https://elibrary.ru/ouymmqb> (in Russian)
15. Kushnerova N.F., Panchenko L.F. Ethnogenetic differences in fatty acid spectra in patients with alcoholism. *Voprosy narkologii*. 1993; (4): 34–8. <https://elibrary.ru/dxspwe> (in Russian)
16. Aminov Z., Haast R., Olson J.R. Racial differences in levels of serum lipids and effects of exposure to persistent organic pollutants on lipid levels in residents of Anniston, Alabama. *Environ. Int.* 2014; 73: 216–23. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.022>
17. Sumner A.E., Vega G.L., Genovese D.J., Finley K.B., Bergman R.N., Boston R.C. Normal triglyceride levels despite insulin resistance in African Americans: role of lipoprotein lipase. *Metabolism*. 2005; 54(7): 902–9. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2005.03.001>
18. Willey J.Z., Rodriguez C.J., Carlino R.F., Moon Y.P., Paik M.C., Boden-Albala B., et al. Race-ethnic differences in the association between lipid profile components and risk of myocardial infarction: The Northern Manhattan Study. *Am. Heart J.* 2011; 161(5): 886–92. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2011.01.018>
19. Boiko E.R. *Physiological and Biochemical Foundations of Human Activity in the North [Fiziologo-biokhimicheskie osnovy zhiznedeiatel'nosti cheloveka na Severe]*. Ekaterinburg; 2005. <https://elibrary.ru/tqogip> (in Russian)
20. Litvyakova O.S. Therapeutic remission of alcoholism in the indigenous population of Chukotka and its dependence on the personal characteristics of the patient. *Narkologiya*. 2021; 20(10): 59–68. <https://elibrary.ru/gvyuxa> (in Russian)
21. Crabb D.W., Matsumoto M., Chang D., You M. Overview of the role of alcohol dehydrogenase and aldehyde dehydrogenase and their variants in the genesis of alcohol-related pathology. *Proc. Nutr. Soc.* 2004; 63(1): 49–63. <https://doi.org/10.1079/pns2003327>
22. Men'shikov V.V. *Laboratory Methods of Research in the Clinic [Laboratornye metody issledovaniya v klinike]*. Moscow: Meditsina; 1987. (in Russian)
23. Novgorodtseva T.P., Endakova E.A., Yan'kova V.I. *Guide to Methods for Studying the Parameters of the System «Perexic Lipid Oxidation – Antioxidant Protection» in Biological Fluids [Rukovodstvo po metodam issledovaniya parametrov sistemy «Perekisnoe okislenie lipidov – antioksidantnaya zashchita» v biologicheskikh zhidkostyakh]*. Vladivostok; 2003. <https://elibrary.ru/qiftgm> (in Russian)
24. Folch J., Lees M., Sloane Stanley G.H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 1957; 226(1): 497–509.
25. Svetashev V.I., Vaskovsky V.E. A simplified technique for thin-layer microchromatography of lipids. *J. Chromatogr.* 1972; 67(2): 376–8. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(01\)91245-2](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(01)91245-2) <https://elibrary.ru/zzbhvp>
26. Rouser G., Kritchevsky G., Yamamoto A. *Lipid Chromatographic Analysis. Volume 1*. New York: Marcell Dekker Inc; 1967: 99–162.
27. Kates M. *Techniques of Lipidology: Isolation, Analysis and Identification of Lipids*. New York; 1972: 129–41.
28. Vaskovsky V.E., Kostetsky E.Y., Vasendin I.M. A universal reagent for phospholipid analysis. *J. Chromatogr.* 1975; 114(1): 129–41. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(00\)85249-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(00)85249-8) <https://elibrary.ru/zyxwgi>

29. Amenta J.S. A rapid chemical method for quantification of lipids separated by thin-layer chromatography. *J. Lipid. Res.* 1964; 5: 270–2.
30. Carreau J.P., Dubacq J.P. Adaptation of a macro-scale method to the micro-scale for fatty acid methyl transesterification of biological lipid extracts. *J. Chromatogr. A.* 1978; 151: 384–90. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)88356-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)88356-9)
31. Christie W.W. Equivalent chain-lengths of methyl ester derivatives of fatty acids on gas chromatography. A reappraisal. *J. Chromatogr. A.* 1988; 447(3): 305–14. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)91490-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)91490-6)
32. Adibhatla R.M., Hatcher J.F. Phospholipase A(2), reactive oxygen species and lipid peroxidation in CNS pathologies. *BMB Rep.* 2008; 41(8): 560–7. <https://doi.org/10.5483/bmbrep.2008.41.8.560> <https://elibrary.ru/hrysux>
33. Fomenko S.E., Kushnerova N.F., Sprygin V.G. Marine green alga *Codium fragile* lipid extract promotes erythrocyte membrane repair in stress-exposed mice. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* 2024; 60(1): 72–83. <https://doi.org/10.1134/S002209302401006X> <https://elibrary.ru/fimjwz>
34. Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P. *Molecular Biology of the Cell.* New York: Garland Science; 2008.
35. Zabelinskii S.A., Chebotareva M.A., Shukolyukova E.P., Krivchenko A.I. Phospholipids, fatty acids and hemoglobin in rat erythrocytes under stress conditions (swimming at low temperature). *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* 2017; 53(1): 17–24. <https://doi.org/10.1134/S0022093017010021> <https://elibrary.ru/yvmfwf>
36. Gurin V.N., Gurin A.V. *Thermoregulation and Biologically Active Substances of Blood [Termoregulyatsiya i biologicheski aktivnye veshchestva krovi]*. Minsk: Biznesofset; 2004. (in Russian)
37. Gurin V.N. *Lipid Metabolism During Hypothermia, Hyperthermia and Fever [Obmen lipidov pri gipotermii, gipertermii i likhoradke]*. Minsk: Belarus'; 1986. (in Russian)
38. Gomara M.J., Nir S., Nieva J.L. Effects of sphingomyelin on melittin pore formation. *Biomembranes.* 2003; 1612: 83–9. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(03\)00107-X](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(03)00107-X) <https://elibrary.ru/xqbrjn>
39. Ivanov I.T. Allometric dependence of the life span of mammal erythrocytes on thermal stability and sphingomyelin content of plasma membranes. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 2007; 147(4): 876–84. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.02.016> <https://elibrary.ru/mfmvuf>
40. Broncel M., Chojnowska-Jezierska J., Koter-Mikhalak M., Franiak I. Erythrocyte fluidity in patients with hyperlipidemia during statins therapy. *Pol. Arch. Med. Wewn.* 2005; 113(6): 531–5. (in Polish)
41. Pokrovskii A.A. Effects of food lipids on the structure and function of biological membranes. In: *Lipids. Structure, Biosynthesis, Transformations and Functions [Lipidy. Struktura, biosintez, prevrashcheniya i fuktsii]*. Moscow: Nauka; 1977: 118–30. (in Russian)
42. Endakova E.A., Novgorodtseva T.P., Svetashev V.I. *Modification of Blood Fatty Acids Composition in Case of Cardio-Vascular Diseases [Modifikatsiya sostava zhirnykh kislot krovi pri serdechno-sosudistykh zabolevaniyakh]*. Vladivostok: Dal'nauka; 2002. <https://elibrary.ru/yyxgcl> (in Russian)

## Сведения об авторах

**Кушнерова Наталья Федоровна**, доктор биол. наук, профессор, зав. лаб. биохимии ТОИ ДВО РАН, 690041, Владивосток, Россия. E-mail: natasha50@mail.ru

**Рахманин Юрий Анатольевич**, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, Заслуженный деятель науки РФ, гл. науч. сотр. НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: YuRakhmanun@csfmba.ru

**Момот Татьяна Викторовна**, доктор мед. наук, профессор каф. биологической химии Института цифрового биодизайна и моделирования живых систем ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия. E-mail: momot\_t\_v@staff.sechenov.ru

**Рыжова Ирина Николаевна**, канд. мед. наук, вед. специалист отд. гигиены, НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: IRyzhova@csfmba.ru

**Фоменко Светлана Евгеньевна**, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. биохимии ТОИ ДВО РАН, 690041, Владивосток, Россия. E-mail: sfomenko@poi.dvo.ru

**Спрыгин Владимир Геннадьевич**, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. биохимии ТОИ ДВО РАН, 690041, Владивосток, Россия. E-mail: vsprygin@poi.dvo.ru

## About the authors

**Natalya F. Kushnerova**, DSc (Biology), professor, head, Laboratory of Biochemistry, V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6476-0039> E-mail: natasha50@mail.ru

**Yuri A. Rakhmanin**, DSc (Medicine), professor, academician of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, chief researcher, A.N. Sytin Research Institute of Human Ecology and Environmental Health, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2067-8014> E-mail: YuRakhmanun@csfmba.ru

**Tatiana V. Momot**, DSc (Medicine), professor, Department of Biological Chemistry, Institute of Digital Biodesign and Modeling of Living Systems, Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 119991, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3873-0343> E-mail: momot\_t\_v@staff.sechenov.ru

**Irina N. Ryzhova**, MD, PhD, leading specialist, Department of Hygiene, A.N. Sytin Research Institute of Human Ecology and Environmental Hygiene, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0696-5359> E-mail: IRyzhova@csfmba.ru

**Svetlana E. Fomenko**, PhD (Biology), leading researcher, Laboratory of Biochemistry, V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 690041, Vladivostok, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0261-0190> E-mail: sfomenko@poi.dvo.ru

**Vladimir G. Sprygin**, PhD (Biology), leading researcher, Laboratory of Biochemistry, V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, 690041, Vladivostok, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7400-909X> E-mail: vsprygin@poi.dvo.ru



Мельников О.А., Жернов Ю.В., Болехан В.Н., Краевой С.А., Юдин С.М.

## Европейский опыт создания национальных систем эпидемиологии сточных вод. Часть 2: Анализ ключевых практик (аналитический обзор)

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»  
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

Отслеживание циркуляции вирусов — важная часть механизма здравоохранения развитых стран, которые в последние годы активно внедряют современные инновационные подходы и методы мониторинга биологических рисков. Созданные в европейских странах системы на основе методологии эпидемиологии сточных вод (ЭСВ) обеспечивают раннее выявление новых и вновь возникающих инфекций на популяционном уровне, способствуют предотвращению угрозы вспышек и эпидемий инфекционных болезней, локализации и снижению биологических рисков для здоровья населения до допустимого уровня.

**Материалы исследования:** научные публикации и стратегические документы Германии, Франции, Италии, Ирландии, Евросоюза в области эпидемиологии сточных вод. Отбор источников осуществлён на основе критериев тематического соответствия, смысловой и функциональной значимости и актуальности научных статей и нормативных документов. Поиск литературных источников и документов проведён в базах данных (БД): на русском языке — eLIBRARY, CyberLeninka; на английском, немецком и французском языках — Web of Science, Scopus, PubMed, Google Scholar, Cochrane Library, а также в национальных БД правительств и парламентов указанных стран. Используемые методы: контент-анализ, систематизация материала, ретроспективный анализ, системный подход, сравнительный анализ, обобщение.

Во 2-й части обзора исследованы функционирующие в Европе системы ЭСВ, созданные по национальным проектам: AMELAG (Германия), NWSP (Ирландия) и SARI (Италия). Немецкий проект AMELAG характеризуется использованием канализационных сетей и очистных сооружений, различающихся по мощности, архитектуре и плотности обслуживаемого населения, а также высокой степенью автоматизации и цифровизации отбора проб, передачи и визуализации данных. Ирландская программа NWSP ориентирована на водосборные бассейны, охватывающие до 70% населения, и интегрирует надзор за полиовирусом. Итальянский проект SARI включает детализированные аналитические протоколы, веб-приложение для ввода данных и геоинформационную базу данных SARI 2.0, интегрированную в европейскую платформу DEEP. Сравнительный анализ систем позволил выделить их общие черты, характерные особенности и направления развития, представляющие интерес для профильных специалистов в Российской Федерации.

**Заключение.** Европейские системы эпидемиологии сточных вод, построенные на современных технологиях, вносят существенный вклад в функционирование национальных систем мониторинга биологических рисков, позволяя проводить прогностическую оценку состояния когортных групп и населения в целом, выявляя не только конкретные патогены или опасные вещества, но и определяя популяционное здоровье населения. Механизм ЭСВ активно внедряется в системы мониторинга радиационных, химических и биологических рисков европейских государств. В России создание аналогичного современного механизма эпидемиологии сточных вод, встроенного в систему мониторинга радиационных, химических и биологических рисков, востребован и необходим, особенно для закрытых административно-территориальных образований и предприятий, обслуживаемых ФМБА России.

**Ключевые слова:** эпидемиология сточных вод (ЭСВ); биологическая безопасность; мониторинг радиационных рисков; мониторинг химических рисков; национальная система Германии; национальная система Ирландии; национальная система Италии; AMELAG; NWSP; проект SARI; аналитический обзор

**Для цитирования:** Мельников О.А., Жернов Ю.В., Болехан В.Н., Краевой С.А., Юдин С.М. Европейский опыт создания национальных систем эпидемиологии сточных вод. Часть 2: Анализ ключевых практик (аналитический обзор). *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 965–974. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-965-974> <https://elibrary.ru/vfbjte>

**Для корреспонденции:** Мельников Олег Александрович, e-mail: [omelnikov@cspfm.ba](mailto:omelnikov@cspfm.ba)

**Вклад авторов:** Мельников О.А. — концепция и дизайн исследования, поиск, сбор, анализ, оценка, систематизация, обобщение и интерпретация данных, подготовка иллюстративного материала и черновика рукописи; Жернов Ю.В. — сбор, систематизация, обобщение и интерпретация данных, редактирование; Болехан В.Н. — научно-методическое сопровождение, редактирование; Краевой С.А. — организационно-методическое сопровождение, редактирование; Юдин С.М. — концепция исследования. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 16.04.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликована: 20.10.2026

Oleg A. Melnikov, Yury V. Zhernov, Vasily N. Bolekhan, Sergey A. Kraevoy, Sergey M. Yudin

## European experience in the development of national wastewater-based epidemiology systems. Part 2: Analysis of key practices (analytical review)

Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation

### ABSTRACT

Monitoring of viral circulation is an important part of the public health framework in developed countries, which in recent years have been actively implementing modern, innovative approaches and methods for monitoring biological risks. Systems developed in European countries based on wastewater-based epidemiology (WBE) methodology ensure the early detection of new and re-emerging infections at the population level, helping to prevent the threat of infectious disease outbreaks and epidemics, and contain and reduce biological risks to public health down to acceptable levels.

The study materials included scientific reports and policy documents from Germany, France, Italy, Ireland, and the European Union on wastewater epidemiology. Sources were selected based on criteria of thematic relevance, semantic and functional significance, and relevance of scientific articles and regulatory documents. A search for literary sources and documents was conducted in the following databases: eLibrary and CyberLeninka in Russian; Web of Science, Scopus, PubMed, Google Scholar, and the Cochran Library in English, German, and French; and national government and parliamentary databases of the aforementioned countries. The methods used included content analysis, data systematization, retrospective analysis, systems approach, comparative analysis, and synthesis.

Part 2 examines WBE systems operating in Europe under national projects: AMELAG (Germany), NWSP (Ireland), and SARI (Italy). The German AMELAG project is characterized by the use of sewer networks and treatment plants differing in capacity, architecture, and population density, as well as advanced automation and digitalization of sampling, data transfer, and visualization. The Irish NWSP focuses on catchment areas covering up to 70% of the population and integrates polio surveillance. The Italian SARI project features detailed analytical protocols, a web-based data entry application, and a GIS-based database (SARI 2.0) integrated with the European DEEP platform. A comparative analysis of the systems allowed identifying their common features, characteristic traits, and development directions of interest to relevant specialists in the Russian Federation.

**Conclusion.** European wastewater-based epidemiology systems, built on modern technologies, make a significant contribution to the functioning of national biological risk monitoring systems, enabling prognostic assessment of the status of cohorts and the population as a whole, identifying not only specific pathogens or hazardous substances but also determining the population's health status. The WBE mechanism is being actively implemented in radiation, chemical, and biological risk monitoring systems in European countries. Today, the creation of a similar modern wastewater-based epidemiology mechanism in Russia, integrated into the radiation, chemical, and biological risk monitoring system, is highly desirable and necessary, especially for closed administrative-territorial entities and enterprises served by FMBA of Russia.

**Keywords:** wastewater-based epidemiology; WBE; biological safety; monitoring of radiation risks; monitoring of chemical risks; monitoring of biological risks; national system of Germany; national system of Ireland; national system of Italy; AMELAG; NWSP; SARI project; analytical review

**For citation:** Melnikov O.A., Zhernov Yu.V., Bolekhan V.N., Kraevoy S.A., Yudin S.M. European experience in the development of national wastewater-based epidemiology systems. Part 2: Analysis of key practices. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 965–974. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-965-974> <https://elibrary.ru/vfbjte> (In Russ.)

**For correspondence:** Oleg A. Melnikov, e-mail: [omelnikov@cspfmba.ru](mailto:omelnikov@cspfmba.ru)

**Contributions:** Melnikov O.A. — concept and design of the study, search, collection, analysis, evaluation, systematization, generalization and interpretation of data, preparation of illustrative material and draft of the manuscript; Zhernov Yu.V. — collection, systematization, generalization and interpretation of data, editing; Bolekhan V.N. — scientific and methodological support, editing; Kraevoy S.A. — managerial and methodological support, editing; Yudin S.M. — concept, approval of the final version. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: April 16, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Национальный проект Германии AMELAG

Один из первых подходов к мониторингу сточных вод на нескольких немецких очистных сооружениях (ОС) был внедрён ещё в ноябре 2020 г. [1–3]. С ноября 2022 г. в Германии реализуется национальный проект надзора за сточными водами для оценки эпидемической ситуации по проекту «Мониторинг сточных вод для оценки эпидемиологической ситуации (Abwassermonitoring für die epidemiologische Lagebewertung, AMELAG)<sup>1</sup>». Цель этого проекта — мониторинг SARS-CoV-2, вирусов гриппа, респираторно-синцитиального вируса (*Respiratory syncytial virus*, *RSV*), а также изучение возможностей мониторинга других патогенов в сточных водах в качестве дополнительного показателя для оценки эпидемической ситуации на уровне федеральных земель и на национальном уровне. Проект финансируется Федеральным министерством здравоохранения. Координаторами и головными исполнителями проекта являются Институт Роберта Коха (Robert-Koch-Institut, RKI) и Федеральное агентство окружающей среды

(Umweltbundesamt, UBA) при участии Федерального министерства окружающей среды, сохранения природы, ядерной безопасности и защиты потребителей (BMUV); органов, ответственных за здравоохранение и охрану окружающей среды 16 федеральных земель; операторов очистных сооружений 16 федеральных земель; государственных лабораторий; поставщиков услуг по логистике (табл. 1).

На первом этапе проекта были разработаны структуры и процессы для общенациональной ЭСВ-сети, а также составлены четыре технических руководства по стандартизированному отбору проб, анализу и обработке данных. Это позволило обеспечить максимально единообразный сбор результатов исследований на наличие SARS-CoV-2 и других патогенов из разных регионов. Для сбора проб были разработаны технические рекомендации на основе материалов по лабораторному анализу. В 2023–2024 гг. были исследованы возможности 170 очистных сооружений Германии, участвовавших в проекте и различающихся по многим параметрам: общесплавной или раздельный тип канализационной системы, её архитектура и мощность, плотность обслуживаемого населения.

Согласно совместному отчёту Института Роберта Коха (RKI) и Федерального агентства окружающей среды (UBA),

<sup>1</sup> Краткое название проекта «Надзор за сточными водами АМЕЛАГ» (Abwassersurveillance AMELAG).

Таблица 1 / Table 1

Проект национальной системы ЭСВ Германии АМЕЛАГ  
German National WBE system project AMELAG

| Показатель<br>Index                      | Характеристика<br>Characteristic                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цель<br>Project goal                     | Создание национальной системы эпидемиологии сточных вод<br>Establishment of a national wastewater-based epidemiology system                                                                                                                                                               |
| Финансирование<br>Funding                | Федеральное министерство здравоохранения<br>Federal Ministry of Health                                                                                                                                                                                                                    |
| Головные исполнители<br>Main contractors | Институт Роберта Коха   Robert Koch Institute<br>Федеральное агентство окружающей среды   Federal Environment Agency                                                                                                                                                                      |
| Участники<br>Participants                | Федеральное агентство BMUV   Federal Agency BMUV<br>Операторы очистных сооружений   Wastewater treatment plant operators<br>Государственные лаборатории   State laboratories<br>Логистики   Logistics<br>Органы здравоохранения и окружающей среды   Health and environmental authorities |
| Этапы<br>Stages                          | Разработка структуры и процессов системы   Development of the system structure and processes<br>Аналитические исследования проб   Digitalization of the project<br>Цифровизация проекта   Digitalization of the project<br>Научно-исследовательские изыскания   Scientific research       |

представленному в рамках проекта АМЕЛАГ в 2026 г.<sup>2</sup>, с 2025 г. пробы неочищенных сточных вод 50 очистных сооружений отбираются на входе в очистные сооружения и анализируются (наряду с такими важными параметрами, как объёмный расход, значение pH и температура) дважды в неделю. Данные параметры необходимы для нормализации и обеспечения качества анализа. Этот упрощённый охват включает данные о сточных водах примерно 25% населения.

Там, где это возможно, пробы неочищенных сточных вод отбирают после фильтрационной камеры с зернистой загрузкой (напорного аппарата очистного сооружения, предназначенного для удаления из воды взвешенных веществ, железа, марганца и других примесей) [4]. Как правило, после первоначальной механической обработки – просеивания и удаления песка – автоматически отбирается 24-часовая сводная проба. Эти образцы транспортируются в лабораторию в охлаждённом виде при температуре плюс 4–10 °С.

Следующий этап (аналитический) включает обработку проб с использованием соответствующих методов обогащения, анализ образцов на наличие SARS-CoV-2 в 22 лабораториях с использованием различных методов, основанных на полимеразной цепной реакции (ПЦР). Очистные сооружения и лаборатории используют дополнительные данные об образцах, такие как суточный приток сточных вод на очистные сооружения (Q), электропроводность (ЕС). Затем извлекается генетическая информация (ДНК/РНК), присутствующие фрагменты вирусных геномов количественно определяются с помощью ПЦР в дополнение к рутинным измерениям фрагментов генов SARS-CoV-2, вирусов гриппа и респираторно-синцитиального вируса человека. Федеральное агентство по охране окружающей среды Германии также разрабатывает и внедряет различные методы для обнаружения иных клинически значимых инфекционных агентов.

Этап цифровизации проекта. Сбор, оценка и передача данных от различных заинтересованных сторон требовали значительных человеческих ресурсов и времени. Поэтому были разработаны информационные панели и соответствующие интерфейсы для автоматизированной передачи и визуализации данных. Такие автоматизированные процессы сэкономили время и упростили выполнение рутинных задач, но требовали комплексных мер обеспечения качества.

С января 2024 г. автоматический пробоотборник в конце камеры для осаждения твёрдых частиц на очистных сооружениях Хагена<sup>3</sup> дважды в неделю в течение 24 ч отбирает пробы и анализирует их в совместной лаборатории. В настоящее время также проводятся испытания по выявлению вирусов гриппа и респираторно-синцитиального вируса. Такой мониторинг патогенов в сточных водах включён и в проект поправки к Директиве ЕС о городских сточных водах в отношении полиомиелита.

С помощью автоматического пробоотборника в течение 24 ч отбирается составная проба. Пробы обычно отбираются в течение 24 ч с понедельника по вторник и со среды по четверг. Как правило, один литр пробы разливается по ёмкостям для образцов и отправляется в аналитическую лабораторию. После проверки качества и достоверности информации данные мониторинга вводят в специализированную базу данных Федерального агентства по охране окружающей среды Германии «Патогены в сточных водах» (PiA-Monitor). Там они обрабатываются для получения достоверных данных с учётом поступления в канализационную систему атмосферных осадков («нормализация»). Нормализованные значения анализируются Институтом Роберта Коха (RKI), интерпретируются и публикуются в виде трендовой кривой в еженедельном отчёте АМЕЛАГ, в «инфекционном радаре» Федерального министерства здравоохранения (BMG). С конца января 2025 г. национальные данные мониторинга сточных вод также публикуются на Европейской панели мониторинга сточных вод вместе с данными из других стран ЕС.

В рамках научно-исследовательских изысканий проекта АМЕЛАГ разрабатываются методы для надёжного обнаружения соответствующих инфекционных агентов и их устойчивости к антибиотикам, а также вирусных патогенов, представляющих угрозу для общественного здравоохранения, в образцах сточных вод. Основное внимание уделяется энтеробактериям с клинически важной устойчивостью к антибиотикам, а также вирусам гриппа А/В и другим респираторным или желудочно-кишечным вирусам. Многоступенчатый скрининг сочетает прямое обнаружение живых бактерий, генов резистентности и информации о последовательности с масс-спектрометрическими, молекулярно-био-

<sup>2</sup> Robert Koch Institute, & Federal Environment Agency (2026). Wastewater Surveillance AMELAG. Zenodo. 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18862629>

<sup>3</sup> Город земельного подчинения в федеральной земле Северный Рейн-Вестфалия на западе Германии.

Таблица 2 / Table 2

Общие характеристики ирландской национальной программы ЭСВ  
General characteristics of the Irish national WBE project

| Показатель   Index                                                           | Характеристика   Characteristic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Наименование национальной программы ЭСВ<br>Name of the national WBE program  | Национальная программа Ирландии по надзору за сточными водами NWSP<br>National Wastewater Surveillance Programme, NWSP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Год запуска программы<br>Year of program launch                              | 2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Инициатор/координатор<br>Initiator/coordinator                               | Центр надзора за охраной здоровья HPSC   Health Protection Surveillance Centre, HPSC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Участники программы<br>Participants of the program                           | Ирландский национальный университет   National University of Ireland, NUI<br>Компания Uisce Éireann*   Company Uisce Ireland*<br>Национальная референс-лаборатория по вирусам NVRL   National Virus Reference Laboratory, NVRL<br>Университетский колледж Дублина UCD   University College Dublin, UCD<br>Подразделение медицинской разведки HIU   Health Intelligence Unit, HIU<br>Школа биомолекулярных и биомедицинских наук UCD   School of Biomolecular and Biomedical Science, UCD |
| Число водосборных бассейнов Ирландии<br>Number of catchments in Ireland      | 30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Частота сбора проб на наличие SARS-CoV-2<br>Frequency of SARS-CoV-2 sampling | Еженедельно (кроме бассейна Рингсенд в Дублине)   Weekly (except Ringsend Pool in Dublin)<br>2 раза в неделю (в бассейне Рингсенд)   Twice a week (at Ringsend Pool)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Охват населения Ирландии<br>Population coverage in Ireland                   | 70%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Примечание. \* Uisce Éireann (панее Irish Water) – государственная компания, предоставляющая услуги водоснабжения в Ирландии.  
Note. \* Uisce Éireann (formerly Irish Water) is a state-owned company that provides water supply services in Ireland.

логическими и секвенирующими методами. Цель состоит во внедрении в ЭСВ-процессы надёжных и гарантированно качественных лабораторных методов.

Концентрации SARS-CoV-2, вирусов гриппа и RSV, измеряемые в настоящее время в сточных водах, определяют более десяти различных лабораторий в рамках проекта AMELAG. Используются различные методы, в том числе связанные с концентрированием образцов, экстракцией вирусного РНК, ПЦР-детектированием последовательностей генов и специфическим ПЦР-анализом.

Концентрация вирусов и других патогенов в сточных водах может существенно изменяться под влиянием различных факторов (атмосферные осадки, сброс промышленных предприятий и др.). Значения показателей потока сточных вод наряду с другими параметрами и характеристиками очистных сооружений являются важными компонентами, необходимыми для получения достоверных данных о концентрации вируса. Немецкое агентство по охране окружающей среды (UBA) разрабатывает автоматизированные методы, позволяющие проводить оценку различных подходов к анализу достоверности и нормализации с учётом специфики объекта. UBA разрабатывает, оптимизирует и документирует необходимые технические процедуры мониторинга сточных вод в технических руководствах, включая отбор проб, лабораторные методы, концепции логистики, а также обработку данных и их передачу в Институт Роберта Коха (RKI). Кроме того, UBA активно участвует в решении задач стандартизации ЭСВ-процессов. В настоящее время проект AMELAG направлен на совершенствование системы мониторинга SARS-CoV-2 в Германии и расширение охвата других патогенов, таких как грипп или бактерии с геномами, устойчивыми к противомикробным препаратам.

Национальная программа Ирландии NWSP

Национальная программа Ирландии по надзору за сточными водами (National Wastewater Surveillance Programme, NWSP) была запущена в 2021 г. во время пандемии

COVID-19 как дополнительный инструмент для мониторинга коронавируса SARS-CoV-2. В основе программы лежит хорошо зарекомендовавший себя метод ЭСВ для определения полиовируса, эффективно используемый в Великобритании и Ирландии для реагирования на вспышки полиомиелита. Первоначально мониторинг сточных вод на наличие полиовируса проводился в водосборном бассейне очистных сооружений Рингсенд, обслуживающих Большой Дублин, который является крупнейшим водосборным бассейном в Ирландии. В феврале 2025 г. тестирование было расширено на пять водосборных бассейнов, обслуживающих почти 70% населения Ирландии: Рингсенд, Корк, Голуэй, Лимерик и Леттеркенни. Еженедельный анализ на наличие SARS-CoV-2 начался с ноября 2023 г. [5]. Вирусная нагрузка SARS-CoV-2 в зоне сбора сточных вод коррелировала с другими показателями циркуляции вируса. Общие характеристики ирландской программы NWSP представлены в табл. 2.

Пробы сточных вод анализируются с помощью количественной ПЦР с обратной транскрипцией для определения концентрации вируса в образце. Образцы проб классифицируются по концентрации вируса в водосборных бассейнах, классы которых представлены в табл. 3.

Количество генетического материала SARS-CoV-2 (вирусная нагрузка, измеряемая в геномных копиях в день) рассчитывается на основе концентрации вируса и скорости потока на очистных сооружениях. Нормализованная по численности населения вирусная нагрузка выражается в геномных копиях в день на человека, проживающего в зоне водосбора. Используется оценка численности постоянного населения в зоне сбора сточных вод, предоставленная компанией Uisce Éireann<sup>4</sup>. Предел количественного определения – это наименьшая концентрация вирусного генетического материала, которую можно достоверно определить количественно в образце сточных вод.

<sup>4</sup> National SARS-CoV-2 Wastewater Surveillance Programme 2026 (01/03/2026 to 07/03/2026). Report prepared on 12/03/2026. https://www.hpsc.ie (дата обращения: 20.03.2026 г.).

Таблица 3 / Table 3

Классификация проб по концентрации вируса SARS-CoV-2 в водосборных бассейнах Ирландии  
Classification of samples based on the SARS-CoV-2 virus concentration in Ireland's catchment areas

| Пробы<br>Samples                      | Концентрация вируса SARS-CoV-2<br>Concentration of the SARS-CoV-2 virus                                                                                                            |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Недоступные<br>Unavailable            | Пробы не были получены или не могли быть полностью проанализированы<br>Samples were not received or could not be fully analyzed                                                    |
| Необнаруженные<br>Undetected          | Концентрация вируса ниже предела обнаружения<br>The virus concentration is below the detection limit                                                                               |
| Слабоположительные<br>Weakly positive | PHK SARS-CoV-2 обнаружена, но её концентрация ниже предела количественного определения<br>SARS-CoV-2 RNA was detected, but its concentration was below the limit of quantification |
| Положительные<br>Positive             | PHK SARS-CoV-2 обнаружена, и её концентрация определяется количественно<br>SARS-CoV-2 RNA has been detected and its concentration is being quantified                              |

Проба сточных вод, взятая в определённое время и в определённом месте, может отражать только состав источника в это время и в этом месте. Составные пробы сточных вод включают множество отдельных дискретных проб, взятых через равные промежутки времени в течение 24 ч.

Зоны водосбора, представленные на **рис. 1**, были выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальный охват населения и разумный географический охват площадей. Лабораторный анализ проб сточных вод на наличие вирусной нагрузки SARS-CoV-2 проводится в Университетском колледже Дублина. После поступления проб сточных вод в лабораторию вирус концентрируют и извлекают генетический материал (PHK), который определяют с помощью количественной ПЦР с обратной транскрипцией для выявления концентрации вируса в сточных водах. Количество вирусного генетического материала, попадающего в очистные сооружения за сутки, можно рассчитать, зная концентрацию вируса и скорость водотока. С помощью метода обобщённых аддитивных моделей, учитывающего нелинейные зависимости и сезонность, сопоставляют наблюдаемые значения и сглаженные тренды.

На количество SARS-CoV-2, обнаруживаемого в сточных водах, влияют не только число людей, инфицированных SARS-CoV-2, и количество выделяемого ими вируса, но и другие факторы. Например, на очистные сооружения попадают поверхностные воды, что отражается на скорости потока сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Таким образом, концентрация SARS-CoV-2 корректируется с учётом суточного расхода воды на очистных сооружениях. Если данные о расходе воды за день, в который был взят смешанный образец, отсутствуют, используется среднегодовой показатель. Смешанные образцы предпочтительнее, так как они отражают состояние сточных вод, проходящих через точку отбора проб в течение 24 ч. Например, обнаружение PHK полиовируса в сточных водах указывает на то, что в популяции может быть человек, являющийся носителем полиовируса. Однако важно отметить, что обнаружение полиовируса в сточных водах не всегда является поводом для беспокойства. Такое может произойти, если человек, недавно привитый живой оральной полиомиелитной вакциной, выделяет следы вакцинного вируса с фекалиями. Если в образце обнаружена PHK полиовируса, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить значимость результата. После обнаружения PHK полиовируса образец сточных вод направляется в Национальную референс-лабораторию по вирусам или в Ирландскую национальную лабораторию по изучению полиомиелита, аккредитованную ВОЗ, для тестового выращивания полиовируса в клеточной культуре в соответствии с протоколами ВОЗ, чтобы подтвердить результат. Если в культуре будет обнаружен полиовирус, проводятся дополнительные лабораторные исследования для получения информации, в том числе о типе обнаруженного вируса полиомиелита.

Окончательный результат, если он соответствует критериям уведомления в соответствии с Международными медицинскими санитарными правилами, официально докладывается в соответствующий комитет ВОЗ [6, 7].



**Рис. 1.** Зоны водосборных бассейнов Ирландии, используемые для обнаружения SARS-CoV-2 по национальной программе NWSP. (Map showing the approximate location of wastewater catchment areas. Сайт ирландского исследовательского репозитория публикаций и исследований в области здравоохранения Lenus: Research Repository. <https://www.lenus.ie> (дата обращения: 16.03.2026 г.).

**Fig. 1.** Catchment areas in Ireland used for SARS-CoV detection by the National Watershed Detection Programme (NWSP). (Map showing the approximate location of wastewater catchment areas. Lenus: Research Repository. <https://www.lenus.ie>).

Таблица 4 / Table 4

**Общие характеристики итальянского национального проекта эпидемиологии сточных вод SARI**  
**General characteristics of the Italian national wastewater-based epidemiology project SARI**

| Показатель   Index                                                                                  | Характеристика   Characteristic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Наименование национального проекта<br>Name of the national project                                  | «Эпидемиологический надзор за SARS-CoV-2 в городских сточных водах» (Sorveglianza Ambientale Reflue in Italia, SARI project)<br>Epidemiological surveillance of SARS-CoV-2 in urban wastewater                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Год запуска проекта<br>Year of project launch                                                       | 2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Цель проекта<br>Project goal                                                                        | Создание национального инструмента для раннего обнаружения и предотвращения вспышек инфекционных болезней<br>Creating a national tool for the early detection and prevention of infectious disease outbreaks                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Инициатор/координатор<br>Initiator/coordinator                                                      | Национальный институт здравоохранения Италии (Istituto Superiore di Sanità, ISS)<br>National Institute of Health of Italy                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Участники программы<br>Participants of the program                                                  | Региональные и местные (автономных провинций) органы здравоохранения<br>Региональные агентства по охране окружающей среды (Agenzia regionale per la protezione ambientale, ARPA)<br>Зоопротифактические институты (Istituto Zooprofilattico Sperimentale, IZS)<br>Университеты<br>Поставщики услуг по очистке сточных вод<br>Исследовательские центры<br>Regional and local (autonomous provinces) health authorities<br>Regional environmental protection agencies, ARPA<br>Zooprophylactic institutes, IZS<br>Universities<br>Wastewater treatment service providers<br>Research centers |
| Количество лабораторий<br>Number of laboratories                                                    | 43                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Количество контролируемых очистных сооружений<br>Number of controlled treatment facilities          | 167                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Частота забора проб на очистных сооружениях<br>Frequency of sampling at wastewater treatment plants | 2 раза в неделю — для крупных городских центров с населением более 150 000 человек<br>1 раз в неделю — для центров с населением от 50 000 до 150 000 человек<br>200 проб сточных вод в неделю в целом по стране<br>Twice a week for large urban centers with populations over 150,000<br>Once a week for centers with populations between 50,000 and 150,000<br>200 wastewater samples per week nationwide                                                                                                                                                                                 |
| Охват населения   Population coverage                                                               | 32 млн человек   32 million people                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

## Итальянский национальный проект SARI

Италия стала одной из первых стран ЕС, начавшей изучать наличие и концентрацию РНК SARS-CoV-2 в городских сточных водах. Вирус был обнаружен на ранней стадии эпидемии в период с февраля по май 2020 г. на севере и в центре страны. Первые исследования по изучению РНК SARS-CoV-2 в городских сточных водах были проведены Национальным институтом здравоохранения Италии (Istituto Superiore di Sanità, ISS). Вирус был обнаружен на очистных сооружениях, расположенных как в районах с высоким, так и с низким уровнем распространения эпидемии (в Милане и Риме соответственно). Уже первые исследования показали, что обнаружение SARS-CoV-2 в неочищенных сточных водах может быть эффективным инструментом выявления эпидемий, изучения тенденций распространения вспышек, оценки распространённости инфекций и описания циркулирующих вариантов вируса путём изучения его разнообразия. Пики экстремальных значений концентрации РНК SARS-CoV-2 в сточных водах стабильно предшествовали максимумам зарегистрированных случаев COVID-19 в среднем на 5,2 дня. Госпитализация наступала с задержкой в 4,25 дня, а поступление в отделение интенсивной терапии — примерно на 6 дней раньше. В двух медицинских округах корреляция была ещё более выраженной: показатели вируса в сточных водах предвещали поступление больных в отделение интенсивной терапии в среднем на 13,5 и 9,5 дня раньше [8]. На основании этих результатов институт ISS запустил

в июле 2020 г. пилотный проект эпидемиологии сточных вод SARI project, а также создал добровольную национальную сеть (без специального финансирования) для мониторинга сточных вод на наличие SARS-CoV-2<sup>5</sup>. В соответствии с рекомендацией ЕС<sup>6</sup> проект SARI с 2021 г. постепенно трансформировался в систему мониторинга, получившую целевое финансирование от правительства Италии и Европейской комиссии [9]. Общие характеристики проекта представлены в табл. 4.

В сеть мониторинга входят очистные сооружения, расположенные в крупных городах с населением более 150 тыс. человек и центрах с населением от 50 до 150 тыс. человек. Каждый регион, участвующий в проекте, выбрал лаборатории для проведения аналитических работ по обнаружению и количественному определению РНК SARS-CoV-2 в пробах сточных вод. В ходе пилотного проекта эксперты ISS разработали аналитические протоколы для выявления и количественного определения SARS-CoV-2 в сточных водах, этапы которого представлены в табл. 5.

<sup>5</sup> Technical protocol for data entry and data management of the national SARI project (Surveillance of SARS-CoV-2 in wastewaters in Italy). <https://10.5281/ZENODO.5950261>

<sup>6</sup> «Рекомендация Комиссии ЕС 2021/472 об общем подходе к организации систематического мониторинга SARS-CoV-2 и его штаммов в сточных водах на территории ЕС» от 17 марта 2021 г. («EU Commission Recommendation 2021/472 on a common approach to establish a systematic surveillance of SARS-CoV-2 and its variants in wastewaters in the EU» of the 17<sup>th</sup> of March 2021).

Таблица 5 / Table 5

### Этапы итальянского аналитического протокола для выявления и количественного определения SARS-CoV-2 в сточных водах

### Steps of the analytical protocol for the detection and quantification of SARS-CoV-2 in wastewater

| Этапы аналитического протокола<br>Stages of the analytical protocol                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Отбор проб на входе в очистные сооружения<br>Sampling at the entrance to treatment facilities        | 24-часовые композитные/смешанные пробы, получаемые (до начала какой-либо обработки) путём объединения серии аликвот равного объёма, собираются с помощью автоматического пробоотборника или вручную в течение определённого периода времени<br>24-hour composite/mixed samples, obtained (before any processing) by combining a series of equal volume aliquots, are collected using an automatic sampler or manually over a specified period of time                                                                                                                                                                  |
| Доставка в лабораторию для дальнейшей обработки<br>Delivery to the laboratory for further processing | В охлаждённом виде<br>Chilled                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Лабораторные аналитические исследования<br>Laboratory analytical studies                             | Концентрирование вирусных частиц с помощью осаждения полиэтиленгликолем с последующим центрифугированием<br>Извлечение вирусной РНК с помощью «бум-технологии»* (с использованием магнитных шариков из диоксида кремния)<br>Определение концентрации (количество копий генома на литр сточных вод)<br>Concentration of viral particles using polyethylene glycol precipitation followed by centrifugation<br>Extraction of viral RNA using "boom technology"* (using magnetic silicon dioxide beads)<br>Determination of concentration (number of genome copies per liter of wastewater)                               |
| Нормализация<br>Normalization                                                                        | Нормализация количественных данных с учётом суточного расхода сточных вод и колебаний концентрации вируса, вызванных дождём или разбавлением другими источниками воды<br>Нормализация по численности населения, эквивалентной площади водоочистных сооружений (для сравнения концентрации в разных городских районах)<br>Normalization of quantitative data based on daily wastewater flow and fluctuations in virus concentration caused by rain or dilution by other water sources<br>Normalization by population equivalent to wastewater treatment plant area (to compare concentrations in different urban areas) |
| Интерпретация<br>Interpretation                                                                      | Представление данных в виде количества копий генома в день на одного человека<br>Data presentation as the number of genome copies per day per person                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Передача данных<br>Data transfer                                                                     | По телекоммуникационной сети и ввод в единую базу данных<br>Data transmission over a telecommunications network and entry into a unified database                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Примечание. \* «Бум-технология» — метод экстракции нуклеиновых кислот У. Бума (Boom) для последующих молекулярно-биологических исследований (например, ПЦР).

Note: \* "Boom technology" is a method of nucleic acid extraction developed by W. Boom for subsequent molecular biological studies (for example, PCR).

Итальянские инженеры, участвовавшие в проекте, разработали специальное веб-приложение для ввода и редактирования информации об образцах сточных вод, чтобы упростить работу сотрудников лабораторий, подключённых к системе мониторинга. Веб-приложение представляет собой цифровую форму, которую пользователь должен заполнить, указав информацию о собранных образцах сточных вод: 1) название/местоположение очистных сооружений,

дата отбора проб, скорость потока в очистных сооружениях и др.; 2) методы анализа: отбор проб, концентрирование, выделение нуклеиновых кислот, молекулярные методы для качественного (наличие/отсутствие) и количественного (вирусная нагрузка и др.) определения. Составление цифровой формы частично автоматизировано, чтобы свести к минимуму необходимость ручного вмешательства.

Введённые в национальную базу данных (БД) сведения отображаются на интерактивной панели, обновляемой в режиме реального времени. Для идентификации пользователя в целях обеспечения удалённого доступа к системе используются имя пользователя (логин) и пароль.

Специалистами Национального центра инновационных технологий общественного здравоохранения, входящего в состав ISS, с применением ГИС-технологий была разработана БД версии SARI 2.0, облегчающая обработку, интерпретацию и визуализацию информации по ЭСВ-проблематике. Было также подготовлено «Руководство пользователя по вводу данных в базу SARI.2.0». В нём подробно описаны методы отбора проб, ввода и управления данными. Перечень информационных слоёв ГИС представлен на рис. 2.

В настоящее время ведутся работы по интеграции базы данных SARI 2.0 с европейской платформой DEEP (Digital European Exchange Platform)<sup>7</sup> для обеспечения быстрого обмена результатами мониторинга сточных вод в электронном виде и их совместного использования для оценки тенденций распространения SARS-CoV-2 в странах ЕС.

<sup>7</sup> <https://wastewater-observatory.jrc.ec.europa.eu/>

Рис. 2. Информационные слои геоинформационной системы SARI 2.0.

Fig. 2. Information layers of the geoinformation system SARI 2.0.

## Характерные черты и особенности европейских ЭСВ-систем

Известные до пандемии COVID-19 клинические методы диагностики позволяли произвести оценку уровня заболеваемости только той части населения, которая обращалась за медицинской помощью в медучреждения в связи с развитием симптомов [10]. У некоторых людей диагностировать болезнь не было возможности, поскольку болезнь протекала бессимптомно; некоторые заболевшие вообще не обращались за помощью в медучреждения. Применение массовой диагностики с помощью ПЦР [11] могло бы устранить эти недостатки, но проведение крупномасштабных тестов требует привлечения значительных материальных, временных и кадровых ресурсов. К тому же в режиме массового скрининга диагностические лаборатории оказываются перегруженными, что увеличивает время выполнения тестов. Перечисленные сложности существенно ограничивают возможности получения достоверной и надёжной диагностической информации, приводят к искажению и недостоверности результатов мониторинга эпидемической ситуации, что в итоге влияет на качество принимаемых должностными лицами решений [12].

Анализ зарубежного опыта показывает, что альтернативу массовому клиническому скринингу населения представляет исследование сточных вод на наличие вирусных частиц, источником которых являются биосубстраты больных и инфицированных людей [13]. Потенциальное преимущество — возможность провести популяционную диагностику населения или когортных групп на основе скрининга с использованием нескольких образцов вне зависимости от доступности клинических тестов, что позволяет выявлять вирусы даже в небольших количествах сточных вод, например, при снижении заболеваемости.

В настоящее время мониторинг сточных вод используется в европейских странах как эффективный инструмент выявления РНК SARS-CoV-2 [14]. Благодаря ранней интеграции результатов ЭСВ органы здравоохранения Германии, Франции, Италии, Ирландии получили возможность использовать информацию из двух независимых систем мониторинга биологических рисков — клинического наблюдения и ЭСВ, что даёт возможность сопоставления и верификации результатов.

Реализуемые на ранних этапах (2021–2022 гг.) европейские проекты (программы) по созданию и функционированию национальных систем ЭСВ (на примерах Германии, Франции, Италии и Ирландии) регулярно обновляются (2023–2024 гг.), совершенствуются и рефинансируются национальными правительствами и Евросоюзом в целом.

Опыт европейских стран показывает, что наиболее эффективным подходом является использование методологии ЭСВ для крупных, средних и малых населённых пунктов с качественной и развитой канализационной системой и современными центрами очистки сточных вод, где проводится основной отбор проб. Такой мониторинг — обоснованная альтернатива крупномасштабному индивидуальному тестированию и диагностированию при проведении мониторинга биологических рисков; он может рассматриваться как самостоятельный инструмент и как составная часть крупного индивидуального тестирования. ЭСВ-мониторинг и ЭСВ-метод в целом требуют пристального внимания профильных специалистов ФМБА России, ответственных за развитие и совершенствование существующей системы мониторинга радиационных, химических и биологических рисков.

Анализ европейской практики показал, что на оценку достоверности результатов в процессе мониторинга сточных вод влияют различные факторы. Так, ложноположительные результаты могут быть вызваны высокой чувствительностью за счёт анализа проб сточных вод с использованием некачественных методов ОТ-ПЦР. К тому же возможность отбора проб сточных вод в значительной степени зависит от архитектуры дренажных систем (наличия резервуара, буферного

лотка или канализационного коллектора) и не всегда реально осуществима. Работать с децентрализованными образцами сточных вод сложно из-за необходимости тщательного отбора проб в домашних хозяйствах. Для решения этой задачи необходим анализ точек повышенного риска, к которым относятся карантинные зоны, больницы и медицинские учреждения.

Изучение мирового эволюционного развития методологии ЭСВ свидетельствует об активном создании цифровых платформ с внедрением в технологические процессы ЭСВ современных инновационных информационных, телекоммуникационных, геоинформационных, инфокоммуникационных технологий, искусственного интеллекта [15]. Так, применение нейросетевых инструментов искусственного интеллекта доказало свою эффективность при работе с большими данными, получение которых возможно лишь при анализе информации из систем ЭСВ на национальном или (в крайнем случае) на региональном уровне. Масштабность охвата данных позволяет формировать такие их наборы, которые могут обеспечить высокое качество обучения задействованных моделей искусственного интеллекта.

Сравнительный анализ подходов к построению национальных систем ЭСВ в четырёх европейских странах (Германия, Франция, Италия и Ирландия) позволяет констатировать следующее. Все ЭСВ-системы были созданы в период развития или сразу после пандемии COVID-19. Национальные ЭСВ-системы имеют общие характерные черты, а также особенности, присущие каждой из стран. Общие черты сформировались в странах Евросоюза с опорой на Рекомендации Комиссии ЕС 2021/472 от 17 марта 2021 г. Они соответствуют описанию механизма эпидемиологического исследования сточных вод, представленному в первой части настоящего аналитического обзора.

Следует отметить следующие индивидуальные характеристики ЭСВ-систем. Для Германии характерно использование канализационных сетей и очистных сооружений, различающихся по многим параметрам: архитектура, мощность канализационной системы, плотность обслуживаемого населения и др., что характерно для Российской Федерации и важно для изучения возможности создания аналогов в организациях и на территориях, обслуживаемых ФМБА России. Для российской стороны представляет интерес опыт автоматизации и цифровизации немецкого проекта: автоматический отбор 24-часовой сводной пробы, разработка и применение баз данных, информационных панелей и интерфейсов автоматизированной передачи и визуализации данных.

Во Франции для российских специалистов, специализирующихся в области совершенствования существующих сетей мониторинга биологических рисков, представляет интерес организационная форма создания сетевого исследовательского Консорциума. Кроме того, результаты и методики НИР, выполненной французскими исследователями на авианосце «Шарль де Голль» [16] с использованием метода ЭСВ, могут быть полезны разработчикам систем ЭСВ для арктических судов Росатомфлота и других российских судов при их обслуживании ФМБА России.

В итальянском проекте российскую сторону могут заинтересовать аналитические протоколы выявления и количественного определения SARS-CoV-2 в сточных водах, дизайн веб-приложений ввода и вывода информации, архитектура геоинформационных систем.

Спецификой Ирландии является компактность территории и возможность применения подходов к организации и созданию систем ЭСВ в закрытых административно-территориальных образованиях, обслуживаемых ФМБА России [17].

## Заключение

Мониторинг сточных вод зарекомендовал себя как надёжный метод обнаружения в человеческой популяции бактериальных и вирусных патогенов. С помощью анализа сточных вод Германия, Франция, Италия и Ирландия про-

водят всесторонний мониторинг новых вспышек болезней на уровне сообществ в режиме реального времени.

Европейские системы ЭСВ, построенные на современных принципах, вносят существенный вклад в функционирование национальных систем мониторинга биологических рисков, позволяя проводить прогностическую оценку состояния когортных групп, а также населения регионов и страны в целом, выявлять не только конкретные патогены или опасные вещества, но и определять состояние популяционного здоровья населения.

Реализуемые на ранних этапах (2021–2022 гг.) европейские проекты/программы по созданию и функционированию национальных систем ЭСВ, изученные на примерах Германии, Франции, Италии и Ирландии, регулярно обновляются, совершенствуются и рефинансируются национальными правительствами и Евросоюзом.

## Литература

(п.п. 1–3, 5, 8, 9, 13–16 см. References)

4. Степанова Е. Сравнительный анализ эффективности биологической очистки сточных вод в России и Германии. *Актуальные исследования*. 2025; (22-1): 30–3. <https://elibrary.ru/psgizb>
6. Сафронова Е.В. Медицинский суверенитет в контексте Пандемического соглашения и поправок к Международным медико-санитарным правилам. *Вестник юридического факультета Южного федерального университета*. 2024; 11(1): 45–50. <https://elibrary.ru/buwnnm>
7. Боговская Е.А., Александрова О.Ю., Зудин А.Б. Всемирная организация здравоохранения: проект новелл в области регулирования международных медико-санитарных правил. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2023; 31(1): 98–105. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2023-31-1-98-105> <https://elibrary.ru/nnpefs>
10. Поклонская Н.В., Амвросьева Т.В., Колтунова Ю.Б., Шилова Ю.А., Бельская И.В. Слежение за циркуляцией вирусов на основе мониторинга сточных вод — как эффективный инструмент контроля за инфекциями и профилактики биологических угроз. *Новости медико-биологических наук*. 2022; 22(2): 104–11. <https://elibrary.ru/ppspeu>
11. Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю., Рудакова М.А., Карамова К.О., Курынцева П.А. Способ мониторинга заболеваемости COVID-19 с использованием анализа сточных вод. Патент РФ № 2743687; 2021. <https://elibrary.ru/nrxmqj>
12. Мельников О.А., Краевой С.А., Болехан В.Н. Угрозы и риски здоровью при чрезвычайных ситуациях: медико-биологические, прогнозно-аналитические и математические аспекты. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2024; 26(4): 13–20. <https://doi.org/10.47183/mes.2024-26-4-13-20> <https://elibrary.ru/chvrne>
17. Мельников О.А., Болехан В.Н., Краевой С.А. Принципы функционирования сети мониторинга биологических рисков на территориях и в организациях, обслуживаемых ФМБА России. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2025; 27(3): 283–94. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-264> <https://elibrary.ru/khpsfa>

## References

1. Saravia C.J., Pütz P., Wurzbacher C., Uchaikina A., Drewes J.E., Braun U., et al. Wastewater-based epidemiology: deriving a SARS-CoV-2 data validation method to assess data quality and to improve trend recognition. *Front. Public Health*. 2024; 12: 1497100. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1497100> <https://elibrary.ru/daeqgz>
2. Rossmann K., Clasen R., Münch M., Wurzbacher C., Tiehm A., Drewes J.E. SARS-CoV-2 crisis management with wastewater early-warning system in the Bavarian district of Berchtesgaden Land, Germany. *Dtsch. Arztebl. Int*. 2021; 118(27–28): 479–80. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2021.0261> <https://elibrary.ru/louydm>
3. Susan A., Pütz P., Greiner T., Lehfeld A.S., Schattschneider A., Buchholz U., Schumacher J. Wastewater-based surveillance as a tool for monitoring and estimating COVID-19 incidence and trends: Insights from Germany, 2022–2024. *Sci. Total Environ*. 2026; 1018: 181290. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181290> <https://elibrary.ru/uvttct>
4. Stepanova E. Comparative analysis of wastewater biological treatment efficiency in Russia and Germany. *Aktual'nye issledovaniya*. 2025; (22-1): 30–3. <https://elibrary.ru/psgizb> (in Russian)
5. Reynolds L., Gonzalez G., Sala-Comorera L., Martin N., Byrne A., Fennema S., et al. SARS-CoV-2 variant trends in Ireland: Wastewater-based epidemiology and clinical surveillance. *Sci. Total Environ*. 2022; 838(2): 155828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155828> <https://elibrary.ru/nyymud>
6. Safronova E.V. Medical sovereignty in the context of the pandemic agreement and amendments to the international health regulations. *Vestnik yuridicheskogo fakul'teta Yuzhnogo federal'nogo universiteta*. 2024; 11(1): 45–50. <https://elibrary.ru/buwnnm> (in Russian)
7. Bogovskaya E.A., Alexandrova O.Yu., Zudin A.B. The world health organization: project of novels in the field of controlling international medical sanitary regulations. *Problemy sotsial'noi gigieny, zdoravookhraneniya i istorii meditsiny*. 2023; 31(1): 98–105. <https://doi.org/10.32687/0869-866X-2023-31-1-98-105> <https://elibrary.ru/nnpefs> (in Russian)
8. Ocagli H., Zambito M., Da Re F., Groppi V., Zampini M., Terrini A., et al. Wastewater monitoring during the COVID-19 pandemic in the Veneto Region, Italy: longitudinal observational study. *JMIR Public Health Surveill*. 2025; 11: e58862. <https://doi.org/10.2196/58862> <https://elibrary.ru/oookdsh>
9. Rossi M., D'Avenio G., La Rosa G., Ferraro G.B., Mancini P., Veneri C. Surveillance of SARS-CoV-2 in urban wastewater in Italy. In: *IEEE International Conference on Digital Health (ICDH)*. Barcelona; 2022: 117–22. <https://doi.org/10.1109/ICDH55609.2022.00026>
10. Poklonskaya N.V., Amvrosieva T.V., Kaltunova Yu.B., Shilova Yu.A., Belskaya I.V. Wastewater based epidemiology as an effective tool for infection surveillance and biological hazards prevention. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk*. 2022; 22(2): 104–11. <https://elibrary.ru/ppspeu> (in Russian)
11. Galitskaya P.Yu., Selivanovskaya S.Yu., Rudakova M.A., Karamova K.O., Kuryntseva P.A. Method for monitoring COVID-19 incidence using wastewater analysis. Patent RF № 2743687; 2021. <https://elibrary.ru/nrxmqj> (in Russian)
12. Melnikov O.A., Kraevoy S.A., Bolekhan V.N. Threats and risks to health in emergency situations: biomedical, predictive analytical, and mathematical aspects. *Meditsina ekstremal'nykh situatsii*. 2024; 26(4): 13–20. <https://doi.org/10.47183/mes.2024-26-4-13-20> <https://elibrary.ru/chvrne> (in Russian)
13. Gogoi G., Singh S.D., Kalyan E., Koch D., Gogoi P., Kshattray S., et al. An interpretative review of the wastewater-based surveillance of the SARS-CoV-2: where do we stand on its presence and concern? *Front. Microbiol*. 2024; 15: 1338100. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1338100>
14. Maryam S., Haq U.I., Yahya G., Algammal A.M., Saber S., Cavalu S. COVID-19 surveillance in wastewater: An epidemiological tool for the monitoring of SARS-CoV-2. *Front. Cell. Infect. Microbiol*. 2023; 12: 978643. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.978643> <https://elibrary.ru/gcvnnq>
15. Li X., Liu H., Gao Li., Sherchan S.P., Zhou T., Khan S.J., et al. Wastewater-based epidemiology predicts COVID-19-induced weekly new hospital admissions in over 150 USA counties. *Nat. Commun*. 2023; 14(1): 4548. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40305-x>
16. Boni M., Gorgé O., Mullot J.U., Wurtzer S., Moulin L., Maday Y., et al. The French Armed Forces Biomedical Research Institute (IRBA) and wastewater-based epidemiology: Applicability and relevance in armed forces. *Bull. Acad. Natl Med*. 2022; 206(8): 1011–21. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.04.025> <https://elibrary.ru/mtfggu> (in French)
17. Melnikov O.A., Bolekhan V.N., Kraevoy S.A. Functioning principles of the network of biological risk monitoring of the federal medical and biological agency of Russia. *Meditsina ekstremal'nykh situatsii*. 2025; 27(3): 283–94. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-264> <https://elibrary.ru/khpsfa> (in Russian)

## Сведения об авторах

Мельников Олег Александрович, вед. специалист, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: omelnikov@cspfmbaru

Жернов Юрий Владимирович, доктор мед. наук, профессор РАН, директор НИИ ЭЧиГОС им. А.Н. Сысина ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: YZhernov@cspfmbaru

**Болахан Василий Николаевич**, доктор мед. наук, доцент, директор ФИАЦ ММБР ФМБА России ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: vbolekhan@cspfmba.ru

**Краевой Сергей Александрович**, канд. мед. наук, первый зам. генерального директора ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: skraevoy@cspfmba.ru

**Юдин Сергей Михайлович**, доктор мед. наук, профессор, генеральный директор ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: Yudin@cspfmba.ru

### About the authors

**Oleg A. Melnikov**, leading specialist, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation. E-mail: omelnikov@cspfmba.ru

**Yury V. Zhernov**, DSc (Medicine), professor, director, A.N. Sysin Research Institute of Human ecology and Environmental Health, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8734-5527> E-mail: YZhernov@cspfmba.ru

**Vasiliy N. Bolekhan**, DS (Medicine), associate professor, director, Federal Information and Analytical Center for Monitoring Biomedical Risks, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2627-5534> E-mail: vbolekhan@cspfmba.ru

**Sergey A. Kraevoy**, MD, PhD (Medicine), first deputy general director, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation <https://orcid.org/0000-0003-1775-9235> E-mail: skraevoy@cspfmba.ru

**Sergey M. Yudin**, DSc (Medicine), professor, general director, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7942-8004> E-mail: Yudin@cspfmba.ru



Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Стратан Г.С., Алексеев М.М., Малышева А.Г., Юдин С.М.

## Гигиеническая оценка качества водных объектов и систем водоснабжения одного из промышленных городов Московской области (г. Красноармейск)

Научно-исследовательский институт экологии человека и гигиены окружающей среды имени А.Н. Сысина  
ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»  
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Промышленные города подвержены повышенной антропогенной нагрузке на водные объекты за счёт сброса сточных вод, поверхностного стока и износа инфраструктуры. Город Красноармейск Московской области — типичный пример такой территории: водоснабжение осуществляется из железско-ассельского водоносного горизонта с природным повышенным содержанием железа, река Воря используется в рекреационных целях, а системы водоотведения характеризуются высокой степенью износа.

**Цель работы** — комплексная гигиеническая оценка качества воды в системе «подземный источник водоснабжения — питьевая вода централизованной системы — сточные воды — поверхностный водоём (река Воря)» на территории г. Красноармейска Московской области на основе ретроспективного анализа данных мониторинга за 2018–2024 гг. и углублённого скрининга 2025 г. с выявлением приоритетных факторов риска.

**Материалы и методы.** Проанализированы пробы питьевой воды (пять водозаборных узлов), воды р. Вори и сточных вод. За период наблюдений исследовано более 100 проб (более 100 показателей). Для выявления статистически значимых трендов использован регрессионный анализ и критерий Манна — Кендалла.

**Результаты.** Для питьевой воды основной проблемой остаются эпизодические превышения ПДК железа (32,1% проб в 2024 г., максимальные концентрации 1,5–2 ПДК). В р. Воре зафиксирован рост содержания нефтепродуктов (с 0,016 до 0,024 мг/л), загрязнение этилбензолом до 2,8 ПДК в зонах рекреации и персистирующее микробное загрязнение (превышения по обобщённым колиформным бактериям и энтерококкам в 30% проб в 2024 г.). В сточных водах отмечается снижение концентраций взвешенных веществ, АПАВ и нефтепродуктов, однако сохраняется стабильно высокая фосфатная нагрузка (11,6–14,25 мг/дм<sup>3</sup>). Выявленные закономерности указывают на необходимость модернизации систем водоподготовки (обезжелезивания) для подземных вод и модернизацию очистки сточных вод для снижения нагрузки на поверхностный водоём.

**Ограничения исследования.** Исследования ограничены характеристикой вод на территории одного города.

**Заключение.** На основании данных ретроспективного анализа (2018–2024 гг.) и углублённого скрининга (2025 г.) дана комплексная оценка: питьевая вода соответствует нормативам, но требует мероприятий для снижения концентрации железа. Река Воря загрязнена микробиологически, выявлен статистически значимый тренд роста содержания нефтепродуктов. Сточные воды формируют устойчивую фосфатную нагрузку — фактор эвтрофикации.

**Ключевые слова:** питьевое водоснабжение; поверхностные воды; сточные воды; мониторинг; обезжелезивание воды; нефтепродукты; санитарно-химические показатели; промышленные города

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике.

**Для цитирования:** Алексеева А.В., Савостикова О.Н., Стратан Г.С., Алексеев М.М., Малышева А.Г., Юдин С.М. Гигиеническая оценка качества водных объектов и систем водоснабжения одного из промышленных городов Московской области (г. Красноармейск). *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 975–981. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-975-981> <https://elibrary.ru/vkzrad>

**Для корреспонденции:** Алексеева Анна Венидиктовна, e-mail: AAlekseeva@cspmrz.ru

**Вклад авторов:** Алексеева А.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи; Савостикова О.Н. — написание текста, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи; Стратан Г.С. — написание текста, редактирование; Алексеев М.М. — сбор материала и обработка данных; Малышева А.Г., Юдин С.М. — редактирование, утверждение окончательного варианта статьи. Все соавторы — ответственность за целостность всех частей статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследования проводились в рамках государственного задания в ФГБУ «ЦСП» ФМБА России.

Поступила: 23.03.2026 / Поступила после доработки: 14.07.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Anna V. Alekseeva, Olga N. Savostikova, Gabriella S. Stratan, Mikhail M. Alekseev,  
Alla G. Malysheva, Sergey M. Yudin

## Hygienic assessment of the quality of water bodies and water supply systems in one of the industrial cities of the Moscow Region (Krasnoarmeysk)

A.N. Sysin Research Institute of Human ecology and Environmental Health, Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of the Russia, Moscow, 119121, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Industrial cities are subject to increased anthropogenic pressure on water bodies due to wastewater discharges, surface runoff, and infrastructure deterioration. Krasnoarmeysk (the Moscow Region) is a typical example of such a territory: water supply is sourced from the Gzhel-Assel aquifer (with naturally elevated iron content), the Vorya River is used for recreational purposes, and wastewater disposal systems are characterized by a high degree of wear.

**The aim of the study** was a comprehensive hygienic assessment of water quality in the system “groundwater source – drinking water of the centralized supply system – wastewater – surface water body (the Vorya River)” in Krasnoarmeysk, the Moscow Region, based on retrospective analysis of monitoring data for 2018–2024 and an in-depth screening in 2025, with identification of priority risk factors.

**Materials and Methods.** Samples of drinking water (five water intake units), water from the Vorya River, and wastewater were analyzed. Over the observation period, more than 100 samples were analyzed for more than 100 parameters. Regression analysis and the Mann–Kendall test were used to identify statistically significant trends.

**Results.** For drinking water, the main problem remains episodic exceeding of the maximum permissible concentration (MPC) for iron (32.1% of samples in 2024, maximum concentrations of 1.5–2 MPC). In the Vorya River, an increase in petroleum product content (from 0.016 to 0.024 mg/L), ethylbenzene pollution up to 2.8 MPC in recreational areas, and persistent microbial contamination (exceeding for total coliform bacteria and enterococci in 30% of samples in 2024) were recorded. In wastewater, a decrease in concentrations of suspended solids, anionic surfactants, and petroleum products was observed; however, a persistently high phosphate load (11.6–14.25 mg/dm<sup>3</sup>) remains. The identified patterns indicate to the need for modernization of water treatment systems (iron removal) for groundwater and upgrading wastewater treatment to reduce the load on the surface water body.

**Limitations.** The research is limited to the characterization of waters within a single city.

**Conclusion.** Based on retrospective analysis (2018–2024) and in-depth screening (2025): drinking water meets standards, but requires iron adjustments. The Vorya River is microbiologically contaminated, and an upward trend in petroleum products was identified. Wastewater creates a persistent phosphate load, a factor in eutrophication.

**Keywords:** water hygiene; drinking water supply; surface water; wastewater; monitoring; water de-ironization; petroleum products; sanitary and chemical indicators; industrial cities

**Compliance with ethical standards.** The study does not require approval from a biomedical ethics committee.

**For citation:** Alekseeva A.V., Savostikova O.N., Stratan G.S., Alekseev M.M., Malysheva A.G., Yudin S.M. Hygienic assessment of the quality of water bodies and water supply systems in one of the industrial cities of the Moscow Region (Krasnoarmeysk). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(9): 975–981. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-975-981> <https://elibrary.ru/vkzrad> (In Russ.)

**For correspondence:** Anna V. Alekseeva, e-mail: AAlekseeva@cspmrz.ru

**Contributions:** Alekseeva A.V. – concept and design of the study, writing text, approval of the final version of the article; Savostikova O.N. – writing text, editing, approval of the final version of the article; Stratan G.S. – writing text, editing; Alekseev M.M. – material collection and data processing; Malysheva A.G., Yudin S.M. – editing, approval of the final version of the article. All co-authors are responsible for the integrity of all parts of the article.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The research was conducted as part of a government assignment at the Center for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia.

Received: March 23, 2026 / Revised: July 27, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Обеспечение населения безопасной питьевой водой, соответствующей гигиеническим нормативам, является фундаментальным условием сохранения общественного здоровья и санитарно-эпидемиологического благополучия<sup>1</sup> [1]. В Российской Федерации реализация масштабных государственных программ, таких как федеральный проект «Чистая вода», направленных на системное преодоление проблем водоснабжения, позволила значительно увеличить долю населения, обеспеченного качественной питьевой водой [2]. Вместе с тем данные мониторинга подтверждают, что проблема гарантированного качества воды сохраняет высокую актуальность для малых и средних промышленных городов с исторически сложившейся инфраструктурой<sup>2</sup> [3]. Именно в таких населённых пунктах комплексный риск для водных объектов формируется под влиянием двух взаимосвязанных групп факторов: устойчивости природного гидрогеохимического фона и интенсивности совокупной антропогенной нагрузки [3, 4].

<sup>1</sup> Директива Европейского Парламента и Совета Европейского союза 2020/2184 от 16 декабря 2020 г. о качестве воды, предназначенной для употребления людьми.

<sup>2</sup> Минстрой России. Паспорт федерального проекта «Чистая вода»; 2024. Доступно: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/140228>

Город Красноармейск (Московская область) – пример территории, где эти факторы проявляются в полной мере. Ключевой природной особенностью является источник централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения – подземные воды гжельско-ассельского водоносного горизонта. Для этого горизонта типично повышенное эндогенное содержание железа и иногда марганца, что создаёт устойчивую технологическую проблему на этапе водоподготовки и требует постоянного контроля эффективности обезжелезивания [5]. Значительное влияние на водные объекты города оказывает антропогенная деятельность [6]. Река Воря, протекающая через городскую территорию и отнесённая ко второй категории водопользования, выполняет важные рекреационные функции, что предъявляет повышенные требования к её санитарно-химическому и микробиологическому качеству в связи с риском для здоровья населения [7]. Состояние реки напрямую зависит от работы систем водоотведения и ливневой канализации, высокий износ которых, усугублённый отсутствием централизованных ливневых коллекторов, повышает риски аварийных и неучтённых сбросов [8]. Важным элементом системы являются сточные воды, сбрасываемые после очистки. Их качество служит индикатором эффективности коммунальных и локальных промышленных очистных сооружений. Наличие в стоках

специфических загрязнителей (нефтепродукты, галогенорганические соединения, тяжёлые металлы) свидетельствует о производственном генезе загрязнения и недостаточной глубине очистки [9].

Необходимо отметить, что подземный горизонт гидравлически не связан с р. Ворей, однако комплексный анализ всех компонентов водной среды на одной урбанизированной территории необходим для гигиенической оценки рисков, связанных с различными путями водопользования (питьевое, рекреационное, водоотведение).

Несмотря на регулярный ведомственный контроль, комплексный анализ всей системы «подземный горизонт — питьевая вода — сточные воды — поверхностный водоём» на территории одного промышленного города ранее не проводился. Отсутствие интегральной оценки не позволяет объективно ранжировать факторы риска и обосновать приоритетные природоохранные меры.

Таким образом, для объективной оценки санитарно-экологической ситуации и выявления приоритетных управленческих решений необходим комплексный подход к мониторингу, охватывающий всю цепочку: источник питьевого водоснабжения, сбрасываемые сточные воды, поверхностный водный объект (река). Ретроспективный анализ многолетних данных по широкому спектру показателей (органолептические, обобщённые, микробиологические, санитарно-химические) является важным инструментом выявления устойчивых трендов, установления причинно-следственных связей и оценки эффективности ранее принятых природоохранных мер.

**Цель исследования** — комплексная гигиеническая оценка качества воды в системе «подземный источник водоснабжения — питьевая вода централизованной системы — сточные воды — поверхностный водоём (р. Воря)» на территории г. Красноармейска Московской области на основе ретроспективного анализа данных мониторинга за 2018–2024 гг. и углублённого скрининга 2025 г. с выявлением приоритетных факторов риска.

## Материалы и методы

Исследование носило комплексный характер и включало два основных этапа: ретроспективный анализ данных многолетнего мониторинга ФГБУ «ЦСП» ФМБА России за период 2018–2024 гг. и углублённое скрининговое исследование компонентов водной среды, выполненное в 2025 г. Объектами исследования служили пробы воды трёх категорий, ежемесячно отбираемые на территории г. Красноармейска Московской области: подземные воды из артезианских скважин (гжельско-ассельский и касимовский горизонты) на пяти водозаборных узлах (ВЗУ № 1–5), вода из резервуаров чистой воды на всех ВЗУ перед подачей в сеть, вода из распределительной (разводящей) сети; поверхностная вода из контрольных створов р. Вори (выше города, в зоне массового купания, ниже города); промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды, отбираемые на территории промышленных предприятий и в месте сброса сточных вод в р. Вору. Анализ проб выполнялся в лабораториях, аккредитованных в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2019. Всего за период наблюдений было отобрано и проанализировано более 100 проб по показателям химического и микробиологического загрязнения, количество которых варьировало по годам (минимальное в 2020–2021 гг., максимальное — в 2024 г.).

Скрининговые исследования охватывали более 100 показателей: органолептические (запах, цветность, мутность), обобщённые (жёсткость, перманганатная окисляемость, рН), химические (тяжёлые металлы, летучие ароматические углеводороды, нефтепродукты, поверхностно-активные вещества (АПАВ), хлорорганические соединения и пестициды и др.).

Оценку соответствия качества воды проводили по нормативам СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвред-

ности для человека факторов среды обитания»<sup>3</sup>. Для выявления статистически значимых изменений за семилетний период применяли методы непараметрической статистики (критерий Манна — У-критерий для оценки трендов) и параметрический критерий Стьюдента для сравнения средних величин в независимых выборках. Различия считались статистически значимыми при уровне вероятности ошибки  $p < 0,05$ . Анализ динамики доли неудовлетворительных проб проводили с использованием регрессионного анализа.

## Результаты

**Качество питьевой воды.** Для санитарно-химической оценки качества воды подземных источников централизованного водоснабжения г. Красноармейска были определены два направления: анализ усреднённых показателей качества и анализ частоты выявления проб, не соответствующих гигиеническим нормативам. Установлено, что среднегодовые концентрации контролируемых показателей не превышали установленных гигиенических нормативов. За период 2018–2024 гг. по органолептическим показателям отмечена тенденция к снижению цветности (с 9,5–10,4 до 5–6,4 град.) и мутности (с 1 до 0,1–1,61 мг/дм<sup>3</sup>). Содержание железа варьировалось от 0,1 до 0,28 мг/дм<sup>3</sup>, оставаясь в пределах допустимых значений. Концентрации тяжёлых металлов (Cu, Pb, Cd, Hg, Be, Co, Se, Cr, Zn), мышьяка, соединений азотной группы на протяжении всего периода наблюдений не обнаруживались либо значения регистрировались в пределах десятых-тысячных долей мг/дм<sup>3</sup>, что характерно для условно фоновых значений подземных вод. Максимальная зарегистрированная концентрация бериллия составила 0,00018, кобальта — 0,001, селена — 0,004, хрома — 0,0016, цинка — 0,00036, меди — 0,00036 мг/дм<sup>3</sup>, что значительно ниже установленных гигиенических нормативов. Данные о среднегодовых концентрациях веществ, загрязняющих воду ЦВС, приведены в **табл. 1**. По средним многолетним показателям вода подземных источников характеризуется как стабильная и соответствующая нормативам. Отдельные колебания связаны с природными особенностями водоносных горизонтов и сезонными факторами.

Несмотря на благополучные средние показатели, анализ индивидуальных проб выявил превышения гигиенических нормативов, динамика которых носила волнообразный характер. В 2018–2019 гг. доля проб, не соответствующих нормативам, составляла 8,6% (5 из 58) и 12,8% (5 из 39) соответственно. Неудовлетворительные результаты регистрировались исключительно по показателю мутности и содержанию железа. Данные результаты могут быть связаны с природными особенностями подземных вод среднего карбона. В 2020–2021 гг. наблюдалось постепенное увеличение доли неудовлетворительных проб до 14,9% (11 из 74) и 16,9% (15 из 89) соответственно. Наиболее неблагоприятная ситуация сложилась в 2022 г., когда доля неудовлетворительных проб достигла максимального значения за весь период наблюдения — 53% (42 из 79). При анализе воды из подземных источников (артезианских скважин) доля проб с превышением ПДК железа в 2024 г. составила 49,3%, что характерно для природного состава гжельско-ассельского горизонта. После водоподготовки в резервуарах чистой воды этот показатель снизился до 32,1% (9 из 28 проб), однако сохраняющиеся превышения (1,5–2 ПДК) свидетельствуют о недостаточной эффективности работы станций обезжелезивания.

Превышений ПДК высокотоксичных элементов (As, Be, Cd, Co, Hg, Ni, Pb) не выявлено. Жёсткость воды (4,7–5,6 °Ж) соответствует норме для региона. Содержание марганца снизилось с 0,023 мг/дм<sup>3</sup> в 2019 г. до 0,001 мг/дм<sup>3</sup> в 2023–2024 гг. В единичных пробах обнаружен побочный продукт хлорирования бромдихлорметан (0,029 мг/л, на границе ПДК 0,03 мг/дм<sup>3</sup>).

<sup>3</sup> СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 1 / Table 1

Среднегодовые концентрации веществ, загрязняющих воду ЦВС, мг/дм<sup>3</sup>  
Average annual concentrations of substances that pollute water in centralized water supply, mg/dm<sup>3</sup>

| Контролируемое соединение<br>Controlled substance                                                                                            | ПДК<br>МРС | Год   Year |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                                                                                                              |            | 2018       | 2019    | 2020    | 2021    | 2022    | 2023    | 2024    |
| Нефтепродукты (суммарно)   Petroleum products (total)                                                                                        | 0.1        | 0.0015     | 0.0021  | 0.0011  | 0.0013  | 0.0014  | 0.0031  | 0.0016  |
| Алюминий (Al, суммарно)   Aluminum (Al, total)                                                                                               | 0.2        | 0.01       | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    |
| Аммиак/аммоний ион (NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )<br>Ammonia/ammonium ion (NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) | 1.5–5.0    | 0.46       | 0.23    | 0.16    | 0.21    | 0.12    | 0.11    | 0.13    |
| Железо (Fe, суммарно)   Iron (Fe, total)                                                                                                     | 0.3        | 0.24       | 0.17    | 0.2     | 0.34    | 0.08    | 0.24    | 0.2     |
| Марганец (Mn, суммарно)   Manganese (Mn, total)                                                                                              | 0.1        | 0.017      | 0.023   | 0.001   | 0.002   | 0.0029  | 0.001   | 0.001   |
| Никель (Ni, суммарно)   Nickel (Ni, total)                                                                                                   | 0.02       | 0.001      | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   |
| Ртуть (Hg, суммарно)   Mercury (Hg, total)                                                                                                   | 0.0005     | 0.00001    | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 |
| Свинец (Pb, суммарно)   Lead (Pb, total)                                                                                                     | 0.01       | 0.00012    | 0.00014 | 0.00016 | 0.00011 | 0.00011 | 0.0001  | 0.00013 |

Ежегодный объём исследований микробиологических показателей воды источников варьировался от 23 до 106 проб в период 2018–2024 гг. Наименьшее количество проб было исследовано в 2020 г. ( $n = 23$ ), наибольшее – в 2023 г. ( $n = 106$ ). В 2018–2021 гг. все исследованные пробы соответствовали гигиеническим нормативам, неудовлетворительные результаты отсутствовали. Первые несоответствия зафиксированы в 2022 г.: 2 пробы (1,9%) не отвечали установленным требованиям. В 2023 и 2024 гг. количество нестандартных проб возросло до 3 ежегодно, доля неудовлетворительных результатов была одинаковой – 2,8%. Важно отметить, что во всех случаях (2022–2024 гг.) после проведения повторных контрольных исследований отобранные пробы полностью соответствовали гигиеническим нормативам, что указывает на оперативность и эффективность принятых корректирующих мер.

**Качество поверхностных вод.** Оценку качества воды р. Вори по санитарно-химическим показателям проводили в рамках мониторинга поверхностных водоисточников. В 2018–2019 гг. исследовали по 9 проб ежегодно. Во всех пробах зафиксировано превышение нормативов химического потребления кислорода (ХПК) и биохимического потребления кислорода (БПК), что свидетельствует о наличии органического загрязнения воды. При этом превышений содержания тяжёлых металлов, нефтепродуктов и поверхностно-активных веществ (ПАВ) не обнаружено, что позволяет предположить преимущественно органическую природу загрязнения без выраженной токсической составляющей. В 2020 г. объём исследований сократился до 6 проб, в 2021–2024 гг. количество проб варьировалось от 5 до 6 в год, поэтому было невоз-

можно в полной мере оценить динамику органического загрязнения, однако косвенные данные свидетельствуют о том, что оно присутствовало.

Анализ содержания металлов и других нормируемых веществ показал, что среднегодовые концентрации большинства показателей не превышали установленных гигиенических нормативов. Данные о среднегодовых концентрациях веществ, загрязняющих воду поверхностных водоисточников, приведены в **табл. 2**. Содержание железа на протяжении всего периода находилось в пределах 0,16–0,55 мг/дм<sup>3</sup>, марганца – 0,001–0,13 мг/дм<sup>3</sup>. Показатель загрязнения нефтепродуктами был в пределах СанПиН 1.2.3685–21<sup>3</sup>. Концентрации тяжёлых металлов (Al, Cd, As, Ni, Pb, Se, Cr, Zn, Cu) на протяжении всего периода наблюдений были значительно ниже предельно допустимых уровней, что свидетельствует об отсутствии загрязнения водотока указанными элементами. Вместе с тем вызывает насторожённость статистически значимый восходящий тренд содержания нефтепродуктов: их концентрация возросла с 0,016 мг/дм<sup>3</sup> в 2018 г. до 0,024 мг/дм<sup>3</sup> в 2024 г. (прирост ~ 50%). В отдельных створах, в зонах рекреационного использования обнаружено загрязнение ароматическими углеводородами: максимальное превышение ПДК этилбензола составило 2,8 раза.

За период 2018–2024 гг. объём микробиологических исследований воды р. Вори характеризовался выраженной неравномерностью. Наименьшее количество проб отобрано в 2020–2021 гг. ( $n = 6$  ежегодно), наибольшее – в 2024 г. ( $n = 50$ ). С 2022 г. отмечается существенное расширение программы исследований: число проб возросло до 22 ежегодно в 2022–2023 гг. и до 50 в 2024 г. Доля удовлетво-

Таблица 2 / Table 2

Среднегодовые концентрации веществ, загрязняющих воду поверхностных водоисточников, мг/дм<sup>3</sup>  
Average annual concentrations of substances that pollute water in surface water sources, mg/dm<sup>3</sup>

| Контролируемое соединение<br>Controlled substance      | ПДК<br>МРС                                       | Год   Year |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                        |                                                  | 2018       | 2019    | 2020    | 2021    | 2022    | 2023    | 2024    |
| Железо (Fe, суммарно)   Iron (Fe, total)               | 1/3/5*                                           | 0.47       | 0.39    | 0.52    | 0.48    | 0.55    | 0.39    | 0.16    |
| Кадмий (Cd, суммарно)   Cadmium (Cd, total)            | 0.001                                            | 0.0002     | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.00016 | 0.00019 | 0.00018 |
| Марганец (Mn, суммарно)   Manganese (Mn, total)        | 0.1/1.0/2.0*                                     | 0.13       | 0.007   | 0.011   | 0.001   | 0.001   | 0.0015  | 0.0018  |
| Нефтепродукты (суммарно)<br>Petroleum products (total) | Не должно быть плёнки<br>There should be no film | 0.016      | 0.021   | 0.018   | 0.021   | 0.03    | 0.02    | 0.024   |
| Никель (Ni, суммарно)   Nickel (Ni, total)             | 0.02                                             | 0.003      | 0.005   | 0.003   | 0.0014  | 0.0016  | 0.003   | 0.0016  |
| Свинец (Pb, суммарно)   Lead (Pb, total)               | 0.01                                             | 0.0002     | 0.00046 | 0.00081 | 0.00013 | 0.0002  | 0.0001  | 0.00016 |

Примечание. \* – согласно СанПиН 1.2.3685–21.

Note: \* – in accordance with SanPiN 1.2.3685–21.

Таблица 3 / Table 3

**Среднегодовые концентрации веществ в сточных водах, мг/дм<sup>3</sup>**  
**Average annual concentrations of substances in wastewater, mg/dm<sup>3</sup>**

| Контролируемое вещество (показатель)<br>Controlled substance (indicator)                       | Год   Year |         |        |        |       |        |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------|--------|-------|--------|---------|
|                                                                                                | 2018       | 2019    | 2020   | 2021   | 2022  | 2023   | 2024    |
| ПАВ анионоактивные (суммарно)<br>(АПАВ) Anionic surfactants (total)                            | 0.114      | 0.1     | 0.023  | 0.1    | 0.016 | 0.011  | 0.012   |
| Взвешенные вещества   Suspended substances                                                     | 2.6        | 1.9     | 2.21   | 2.13   | 1.65  | 1.7    | 1.26    |
| Железо (Fe, суммарно)   Iron (Fe, total)                                                       | 0.18       | 0.76    | 0.55   | 0.34   | 0.26  | 0.36   | 0.27    |
| Медь (Cu, суммарно)   Copper (Cu, total)                                                       | 0.0003     | 0.00028 | 0.0008 | 0.0028 | 0.008 | 0.0046 | 0.00013 |
| Нефтепродукты (суммарно)   Petroleum products (total)                                          | 0.127      | 0.032   | 0.071  | 0.014  | 0.064 | 0.031  | 0.017   |
| Нитраты (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )   Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )             | 0.1        | 0.1     | 0.1    | 0.1    | 0.1   | 0.1    | 0.1     |
| Нитриты (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )   Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )             | 0.05       | 0.16    | 0.03   | 0.021  | 0.018 | 0.026  | 0.022   |
| Полифосфаты (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )   Polyphosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) | 16.2       | 10.5    | 11.6   | 12.36  | 14.25 | 11.36  | 12.6    |

рительных проб варьировалась от 13,33% в 2018–2019 гг. до 83,33% в 2021 г. В 2018 и 2019 гг. при исследовании 15 проб ежегодно зарегистрировано по 2 нестандартных результата по показателю «общие колиформные бактерии» (ОКБ), что составило 13,33%. При этом паразитологические показатели, колифаги и возбудители кишечных инфекций не обнаруживались.

Резкое ухудшение качества воды зафиксировано в 2020–2021 гг. В 2020 г. из 6 исследованных проб 3 не соответствовали нормативам по ОКБ и термотолерантным колиформным бактериям (ТКБ), доля нестандартных проб достигла 50%. В 2021 г. при том же объёме исследований ( $n = 6$ ) неудовлетворительные результаты выявлены в 5 пробах – 83,33%. Превышения регистрировались и выше города по течению реки, и по створам в середине и ниже по течению. С 2022 г. на фоне увеличения объёма исследований доля нестандартных проб снизилась, однако оставалась стабильно высокой: в 2022 г. – 31,8% (7 неудовлетворительных проб из 22), в 2023 г. – 27,27% (6 из 22), в 2024 г. – 30% (15 из 50).

Анализ микробного загрязнения показал, что во всех нестандартных пробах 2022–2024 гг. регистрировалось превышение по ОКБ: в 2024 г. оно составило от 3,2 до 160 раз. Также в пробах из р. Вори систематически обнаруживалось превышение гигиенического норматива энтерококков в 1,4–6,2 раза. Холерный вибрион и патогенные бактерии рода *Salmonella* за весь период наблюдений не были обнаружены.

Таким образом, с 2020 г. по настоящее время качество воды поверхностных водоёмов характеризуется стабильно высокой долей проб, не соответствующих гигиеническим нормативам по микробиологическим показателям. Наиболее неблагоприятная ситуация сложилась в 2021 г. (83,33% нестандартных проб). Несмотря на некоторое снижение доли нестандартных проб в 2022–2024 гг. по сравнению с пиковым значением, уровень микробного загрязнения остаётся значительным и имеет тенденцию к сохранению.

**Качество сточных вод.** Результаты исследований сточных вод за период 2018–2024 гг. представлены в табл. 3. Анализ охватывал широкий перечень показателей, в том числе содержание взвешенных веществ, органических соединений (АПАВ, нефтепродукты), биогенных элементов (азот-, фосфорсодержание) и тяжёлых металлов. Необходимо отметить, что маркерами промышленного генеза являются нефтепродукты и тяжёлые металлы. Взвешенные вещества, нитраты, нитриты и АПАВ характерны для смешанного коммунально-промышленного стока. Анализ сточных вод за 2018–2024 гг. выявил высокий уровень загрязнения. Содержание нефтепродуктов снизилось с 0,127 мг/дм<sup>3</sup> в 2018 г. до 0,017 мг/дм<sup>3</sup> в 2024 г., но в отдельные годы превышало нормативы. Концентрация меди колебалась, достигая максимума 0,008 мг/дм<sup>3</sup> в 2022 г. Содержание взвешенных ве-

ществ колебалось в пределах 1,26–2,6 мг/дм<sup>3</sup>. Максимум пришёлся на 2018 г. (2,6 мг/дм<sup>3</sup>), минимум – на 2024 г. (1,26 мг/дм<sup>3</sup>). Прослеживается общая тенденция к снижению показателя. Значения концентрации АПАВ находились в интервале 0,011–0,114 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшие показатели были зафиксированы в 2018 и 2021 гг. (0,114 и 0,1 мг/дм<sup>3</sup> соответственно), тогда как уже к 2020 г. обозначилась устойчивая тенденция к снижению: содержание АПАВ опустилось до 0,011–0,023 мг/дм<sup>3</sup> и в последующем держалось на этом уровне. Такую динамику можно расценивать как свидетельство повышения эффективности очистки. Диапазон показателя содержания полифосфатов оказался шире – от 10,5 до 16,2 мг/дм<sup>3</sup>. Максимальное значение (16,2 мг/дм<sup>3</sup>) зафиксировано в 2018 г., минимальное (10,5 мг/дм<sup>3</sup>) – в 2019 г. В последующие годы уровень стабилизировался в пределах 11,6–14,25 мг/дм<sup>3</sup>, причём заметной тенденции к уменьшению не прослеживалось. В сочетании с повышенными концентрациями нитритов это создаёт риск эвтрофикации водного объекта. Совокупность полученных результатов свидетельствует о необходимости модернизации очистных сооружений. В первую очередь требуется внедрение технологий удаления биогенных элементов и специфических загрязнителей промышленного происхождения.

## Обсуждение

Проведённый комплексный анализ позволил дифференцировать для каждого из изученных объектов Красноармейска проблемы качества воды и установить их вероятные причины, что создаёт основу адресного планирования корректирующих мероприятий.

Качество питьевой воды подземных источников и централизованного водоснабжения в целом может быть оценено как стабильно удовлетворительное. Среднегодовые концентрации контролируемых веществ на протяжении всего периода не превышали гигиенических нормативов, а содержание токсикантов (мышьяк, кадмий, ртуть, свинец) находилось на уровне фоновых значений, характерных для подземных вод данного региона. Это подтверждает эффективность барьерной роли водоносного горизонта и существующей системы водоподготовки. Основной проблемой остаются эпизодические превышения содержания железа и показателя мутности в пробах, доля которых после пикового значения 2022 г. (53%) в 2024 г. сохраняется на высоком уровне (32,1%). Данный факт полностью согласуется с гидрогеохимическими особенностями гжельско-ассельского горизонта, для которого повышенное фоновое содержание железа является типичным [5, 10] и указывает на необходимость оптимизации работы станций обезжелезивания либо внедрения дополнительных технологических ступеней. Положительной динамикой можно считать сни-

жение содержания марганца (с 0,023 мг/дм<sup>3</sup> в 2019 г. до 0,001 мг/дм<sup>3</sup> в 2023–2024 гг.). Обнаружение в единичных пробах бромдихлорметана на уровне ПДК (0,029 мг/дм<sup>3</sup>) требует внимания, поскольку побочные продукты дезинфекции являются объектом пристального контроля в связи с потенциальными отдалёнными рисками для здоровья<sup>4</sup> [11, 12]. Ситуация усугубляется отсутствием утверждённых проектов зон санитарной охраны (ЗСО) для двух из пяти водозаборных узлов (ВЗУ № 3 и № 4). Это создаёт потенциальные риски загрязнения источников и не позволяет в полной мере гарантировать эпидемиологическую безопасность водоснабжения в долгосрочной перспективе.

Санитарно-химическое состояние р. Вори по большинству показателей можно признать благоприятным. Содержание железа и марганца на протяжении всего периода соответствовало требованиям СанПиН 1.2.3685–21 для водных объектов рекреационного водопользования. Концентрации тяжёлых металлов оставались стабильно низкими. Вместе с тем выявлены тенденции, требующие внимания. Статистически значимый рост содержания нефтепродуктов (примерно на 50% за семь лет) является маркером увеличения антропогенной нагрузки, связанной с поверхностным стоком с автодорог, промышленных площадок и, возможно, неучтёнными сбросами [13]. Обнаружение ароматических углеводородов (этилбензол) в зонах рекреации прямо указывает на локальные источники загрязнения, требующие выявления и ликвидации. Микробиологическое качество воды остаётся наиболее чувствительным индикатором антропогенного влияния. Доля проб, не соответствующих нормативам, после пика 2021 г. (83,3%) стабилизировалась на уровне около 30% (2024 г. – 30%). Персистирующее микробное загрязнение р. Вори, регистрируемое в том числе выше города, указывает на совокупное влияние нескольких факторов: поверхностного стока с урбанизированных и прилегающих территорий, смывов с автодорог [14], а также эпизодических поступлений недостаточно очищенных или неочищенных сточных вод, что согласуется с высоким износом канализационных сетей и отсутствием централизованных ливневых коллекторов. Это указывает на необходимость совершенствования системы водоотведения и ливневой канализации, а также усиления контроля источников загрязнения в водосборном бассейне.

<sup>4</sup> National Toxicology Program. 15<sup>th</sup> Report on Carcinogens. Rep Carcinog. 2021 Dec 21;15:roc15. doi: 10.22427/NTP-OTHER-1003; PMID: 39456132

Анализ состава сточных вод подтвердил их преимущественно смешанный генезис. Присутствие стабильно высоких концентраций полифосфатов и наличие маркеров бытовых стоков (АПАВ) указывает на значительный вклад коммунального сектора. В то же время содержание нефтепродуктов и меди (с характерной нестабильностью концентраций) является прямым подтверждением промышленного влияния, обусловленного деятельностью предприятий города. За анализируемый период прослеживается положительная динамика ряда показателей. Так, содержание взвешенных веществ сократилось с 2,6 до 1,26 мг/дм<sup>3</sup>, АПАВ – с 0,114 до 0,012 мг/дм<sup>3</sup>, а концентрация нефтепродуктов снизилась с 0,13 до 0,017 мг/дм<sup>3</sup>. Вероятнее всего, это связано с проведённой модернизацией очистных сооружений. Несмотря на положительную динамику ряда показателей, на протяжении всего периода наблюдений фосфатная нагрузка остаётся стабильно высокой – на уровне 11,6–14,25 мг/дм<sup>3</sup>, при этом тенденции к снижению не выявлено. Поступление биогенных элементов служит ключевым фактором эвтрофикации водных объектов и негативно сказывается на качестве воды р. Вори [15].

## Заключение

Проведённый комплексный ретроспективный анализ данных мониторинга за 2018–2024 гг. и углублённого скрининга 2025 г. позволил дать комплексную гигиеническую оценку качества воды в системе «подземный горизонт – питьевая вода – сточные воды – поверхностный водоём» на территории г. Красноармейска и достичь поставленной цели исследования.

Установлено, что в системе водоснабжения и водоотведения г. Красноармейска сформировались три приоритетных фактора риска: обусловленное геохимическими особенностями загрязнение подземных вод железом, персистирующее микробное загрязнение р. Вори и устойчивая фосфатная нагрузка от сточных вод. Полученные результаты формируют основу адресных управленческих решений: оптимизации системы обезжелезивания на станции водоподготовки, технологического переоснащения очистных сооружений для извлечения фосфатов, реконструкции канализационных и ливневых сетей для предотвращения неучтённых сбросов. Реализация указанных мероприятий позволит снизить антропогенную нагрузку на водные объекты, укрепить санитарно-эпидемиологическую надёжность водоснабжения и обеспечить устойчивое функционирование водохозяйственного комплекса города.

## Литература

1. Рахманин Ю.А., Синицына О.О., Егорова Н.А., Турбинский В.В., Алексеева А.В., Кузь Н.В. и др. Достижения и перспективные направления научных разработок в области гигиенического нормирования качества воды в централизованных системах водообеспечения населённых мест. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(1): 6–14. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-1-6-14> <https://elibrary.ru/ayfaal>
2. Горбанев С.А., Мясников И.О., Новикова Ю.А., Тихонова Н.А. Совершенствование системы управления качеством питьевой воды при реализации федерального проекта «Чистая вода». *Гигиена и санитария*. 2022; 101(10): 1167–73. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1167-1173> <https://elibrary.ru/hvhwlp>
3. Дядюрин А.Ю., Король В.В. Федеральный проект «Чистая вода» как инструмент системного решения проблем водоснабжения и водоотведения в Центральном федеральном округе. В кн.: *Современные тенденции в науке, технике, образовании: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Орёл; 2025: 50–9. <https://elibrary.ru/wwwpcgs>
4. Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов Ю.О. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. М.: Мир науки; 2017.
5. Галицкая И.В., Жигалин А.Д., Костинова И.А., Позднякова И.А., Баринов А.С., Коренков И.П. и др. Закономерности формирования гидрогеохимических и радиационных условий на территории северо-восточной части Сергиево-Посадского района. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2010; (5): 399–409. <https://elibrary.ru/mujqar>
6. Нефедова Е.Г. Урбанизация как один из основных факторов повышения антропогенной нагрузки на водные экосистемы Воронежской области. В кн.: *Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии*. Санкт-Петербург; 2018: 416–20. <https://elibrary.ru/uaixta>
7. Попова А.Ю., Кузьмин С.В., Механтьев И.И. Оценка эффективности реализации системного подхода к обеспечению гигиенической безопасности питьевого и рекреационного водопользования населения на примере Воронежской области. *Здоровье населения и среда обитания – ЗНУСО*. 2021; 29(8): 7–14. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-8-7-14> <https://elibrary.ru/fdconj>
8. Цгоев Т.Ф., Амбалов В.Б. Экологическое состояние малых рек на примере РСО-Алания. *Национальная Ассоциация Ученых*. 2020; 58(3): 24–7. <https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2020.3.58.284> <https://elibrary.ru/wqkdkr>
9. Фонова С.И., Бурак Е.Э., Эпиташвили А.В. Исследование сточных вод, прошедших очистку на городской станции очистки сточных вод. В кн.: *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций*. Москва; 2022: 150–2. <https://elibrary.ru/nlieng>
10. Трифонова Т.А., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Курбатов Ю.Н. Гигиеническая оценка содержания железа в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения Владимирской области. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(10): 1035–42. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-10-1035-1042> <https://elibrary.ru/kjlila>

## Original article

11. Wang Y., Zhu G., Engel B. Health risk assessment of trihalomethanes in water treatment plants in Jiangsu Province, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 170: 346–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.004>
12. Aschengrau A., Janulewicz P.A., White R.F., Vieira V.M., Gallagher L.G., Getz K.D., et al. Long-term neurotoxic effects of early-life exposure to tetrachloroethylene-contaminated drinking water. *Ann. Glob. Health.* 2016; 82(1): 169–79. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2016.01.013>
13. Bakr A.R., Fu G.Y., Hedeem D. Water quality impacts of bridge stormwater runoff from scupper drains on receiving waters: a review. *Sci. Total Environ.*

2020; 726: 138068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138068> <https://elibrary.ru/dggrqx>

14. Каторгина Н.О., Лукина А.В. Сети водоснабжения и их влияние на окружающую среду городских территорий. *Проблемы науки.* 2016; 12(13): 36–8. <https://elibrary.ru/xepnsl>
15. Yesigat A., Worku A., Mekonnen A., Bae W., Feyisa G.L., Gatew S., et al. Phosphorus recovery as K-struvite from a waste stream: a review of influencing factors, advantages, disadvantages and challenges. *Environ. Res.* 2022; 214(Pt 3): 114086. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114086> <https://elibrary.ru/xfbned>

## References

1. Rakhmanin Yu.A., Sinitsyna O.O., Egorov N.A., Turbinsky V.V., Alekseeva A.V., Kuz N.V., et al. Achievements and promising directions of scientific research in the field of hygienic regulation of water quality in centralized water supply systems of populated areas. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2026; 105(1): 6–14. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-1-6-14> <https://elibrary.ru/ayfaal> (in Russian)
2. Gorbanev S.A., Myasnikov I.O., Novikova Yu.A., Tikhonova N.A. Improving the drinking water quality management system during the implementation of the federal project “Clean Water”. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(10): 1167–73. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1167-1173> <https://elibrary.ru/hvhwph> (in Russian)
3. Dyadyurin A.Yu., Korol V.V. Federal project “Clean Water” as a tool for systemic solution of water supply and sanitation problems in the Central Federal District. In: *Modern Trends in Science, Technology, Education: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference [Sovremennyye tendentsii v nauke, tekhnike, obrazovanii: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Orel; 2025: 50–9. <https://elibrary.ru/wvpcgs> (in Russian)
4. Zlobina V.L., Medovar Yu.A., Yushmanov Yu.O. *Transformation of the composition and properties of groundwater under environmental changes [Transformatsiya sostava i svoystv podzemnykh vod pri izmenenii okruzhayushchei sredy]*. Moscow: Mir nauki; 2017. (in Russian)
5. Galitskaya I.V., Zhigalin A.D., Kostikova I.A., Pozdnyakova I.A., Barinov A.S., Korenkov I.P., et al. Patterns of formation of hydrogeochemical and radiation conditions in the north-eastern part of the Sergiev Posad district. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2010; (5): 399–409. <https://elibrary.ru/mujqar> (in Russian)
6. Nefedova E.G. Urbanization as one of the main factors increasing anthropogenic load on aquatic ecosystems of the Voronezh region. In: *Third Vinogradov Readings. Facets of Hydrology [Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii]*. St. Petersburg; 2018: 416–20. <https://elibrary.ru/uaajta> (in Russian)
7. Popova A.Yu., Kuzmin S.V., Mekhantsev I.I. Assessment of implementation efficiency of the system approach to ensuring safety of public drinking and recreational water use on the example of the Voronezh Region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya — ZNiSO*. 2021; 29(8): 7–14. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-8-7-14> <https://elibrary.ru/fdconj> (in Russian)
8. Tsgoev T.F., Ambalov V.B. Ecological state of small rivers on the example of North Ossetia-Alania. *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh*. 2020; 58(3): 24–7. <https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2020.3.58.24> <https://elibrary.ru/wqkdkr> (in Russian)
9. Fonova S.I., Burak E.E., Epitashvili A.V. Study of wastewater treated at a municipal wastewater treatment plant. In: *Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation: Proceedings of the Seventeenth All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition of Surveying Organizations [Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii]*. Moscow; 2022: 150–2. <https://elibrary.ru/nlieng> (in Russian)
10. Trifonova T.A., Selivanov O.G., Martsev A.A., Kurbatov Yu.N. Hygienic assessment of iron content in sources of domestic drinking water supply in the Vladimir region. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(10): 1035–42. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-10-1035-1042> <https://elibrary.ru/kjlila> (in Russian)
11. Wang Y., Zhu G., Engel B. Health risk assessment of trihalomethanes in water treatment plants in Jiangsu Province, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 170: 346–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.004>
12. Aschengrau A., Janulewicz P.A., White R.F., Vieira V.M., Gallagher L.G., Getz K.D., et al. Long-term neurotoxic effects of early-life exposure to tetrachloroethylene-contaminated drinking water. *Ann. Glob. Health.* 2016; 82(1): 169–79. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2016.01.013>
13. Bakr A.R., Fu G.Y., Hedeem D. Water quality impacts of bridge stormwater runoff from scupper drains on receiving waters: a review. *Sci. Total Environ.* 2020; 726: 138068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138068> <https://elibrary.ru/dggrqx>
14. Katorgina N.O., Lukina A.V. Water supply networks and their impact on the environment of urban areas. *Problemy nauki.* 2016; 12(13): 36–8. <https://elibrary.ru/xepnsl> (in Russian)
15. Yesigat A., Worku A., Mekonnen A., Bae W., Feyisa G.L., Gatew S., et al. Phosphorus recovery as K-struvite from a waste stream: a review of influencing factors, advantages, disadvantages and challenges. *Environ. Res.* 2022; 214(Pt 3): 114086. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114086> <https://elibrary.ru/xfbned>

## Сведения об авторах

**Алексеева Анна Венидиговна**, канд. мед. наук, начальник отд. гигиены, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: AAlekseeva@cspmrz.ru

**Савостикова Ольга Николаевна**, канд. мед. наук, начальник отд. физико-химических методов исследования и экотоксикологии, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: OSavostikova@cspmrz.ru

**Стратан Габриэлла Сергеевна**, лаборант отд. гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: GStratan@cspfmbr.ru

**Алексеев Михаил Максимович**, мл. науч. сотр. отд. физико-химических методов исследования и экотоксикологии, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: MAlekseev@cspmrz.ru

**Малышева Алла Георгиевна**, доктор биол. наук, профессор, вед. науч. сотр. ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: AMalysheva@cspfmbr.ru

**Юдин Сергей Михайлович**, доктор мед. наук, профессор, генеральный директор ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: info@cspfmbr.ru

## About the authors

**Anna V. Alekseeva**, PhD (Medicine), head, Department of hygiene, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0422-8382> E-mail: AAlekseeva@cspmrz.ru

**Olga N. Savostikova**, PhD (Medicine), head, Department of Physicochemical Research Methods and Ecotoxicology, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7032-1366> E-mail: OSavostikova@cspmrz.ru

**Gabriella S. Stratan**, laboratory assistant, Department of Hygiene, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-5721-4531> E-mail: GStratan@cspfmbr.ru

**Mikhail M. Alekseev**, junior researcher, Department of Physicochemical Research Methods and Ecotoxicology, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-7587-090X> E-mail: MAlekseev@cspmrz.ru

**Alla G. Malysheva**, DSc (Biology), professor, leading researcher, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3112-0980> E-mail: AMalysheva@cspfmbr.ru

**Sergey M. Yudin**, DSc (Medicine), professor, general director, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7942-8004> E-mail: info@cspfmbr.ru



Шевченко О.И., Лахман О.Л., Сливницына Н.В., Русанова Д.В.

## Изменение функциональной активности головного мозга в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни, обусловленной воздействием локальной вибрации

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Выявление специфики изменения показателей нейрофункциональной активности позволит определить диагностические признаки функциональных нарушений ЦНС у пациентов в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни (ВБ), обусловленной воздействием локальной вибрации.

**Цель исследования** — оценить состояние функциональной активности мозга в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни, обусловленной воздействием локальной вибрации.

**Материалы и методы.** Изучены характеристики уровня постоянного потенциала (УПП), соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП), нейропсихологические особенности 30 пациентов с I степенью ВБ (ВБ I ст.) и 51 пациента со II степенью ВБ (ВБ II ст.).

**Результаты.** При сравнении показателей обеих групп у пациентов с ВБ II ст. установлено повышение УПП в центральном правом отведении, латентности компонентов N9, N10, P25, снижение функции экспрессивной речи, среднего значения по шкале МоСА. Для ВБ II ст. в отличие от ВБ I ст. характерно снижение функции реципрокной координации, модально-специфической оперативной памяти (зрительной образной), увеличение латентности пиков N11, N13 и усреднённого по двенадцати отведениям УПП.

**Ограничения исследований** определяются отсутствием результатов воздействия локальной вибрации на церебральную гемодинамику, краткой характеристикой условий труда.

**Заключение.** В работе показана значимость диагностики изменений функциональной активности ГМ в зависимости от выраженности ВБ, а выявленные патофизиологические изменения расширяют понимание роли центральных механизмов регуляции в динамике прогрессирования профессиональной болезни и могут быть использованы для мониторинга развития функциональных нарушений центральной нервной системы.

**Ключевые слова:** вибрационная болезнь; функциональная активность мозга; уровень постоянного потенциала; соматосенсорные вызванные потенциалы; нейропсихологическое тестирование; дифференциальная диагностика

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключения ЛЭК № 3 от 16.02.2021 г. и № 5 от 21.03.2023 г.) и выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (с поправками 2024 г.). Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Шевченко О.И., Лахман О.Л., Сливницына Н.В., Русанова Д.В. Изменение функциональной активности головного мозга в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни, обусловленной воздействием локальной вибрации. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 982–986. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-982-986> <https://elibrary.ru/vlyxus>

**Для корреспонденции:** Шевченко Оксана Ивановна, e-mail: oich68@list.ru

**Вклад авторов:** Шевченко О.И. — концепция и дизайн исследования, анализ данных общей базы, сбор данных по НЭК, нейропсихологическое обследование, написание текста, структурирование статьи; Лахман О.Л. — концепция исследования, редактирование; Сливницына Н.В. — сбор и анализ клинических данных; Русанова Д.В. — сбор данных по ССВП. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания по фундаментальным научным исследованиям.

Поступила: 17.04.2026 / Поступила после доработки 23.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Oxana I. Shevchenko, Oleg L. Lakhman, Natalya V. Slivnitsyna, Dina V. Rusanova

## Changes in the functional activity of the brain depending on the severity of vibration disease caused by exposure to local vibration

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russia Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Identifying the characteristics of changes in indicators characterizing neurofunctional activity will make it possible to determine the diagnostic signs of functional disorders of the central nervous system in patients depending on the severity of vibration disease (VD) caused by exposure to local vibration.

**The aim of the study** is to identify changes in neurophysiological and neuropsychological indicators depending on the severity of vibration disease caused by exposure to local vibration to assess the state of functional activity of the brain.

**Materials and methods.** The characteristics of the DC-potential level, SSSP, and neuropsychological features were studied in thirty patients with VD grade I (VD I) and in 51 patients with VD grade II (VD II).

**Results.** When comparing the indicators in both groups in patients with cerebrovascular accident stage II, an increase in the DC-potential level in the central right lead, the latency of components N9, N10, P25, a decrease in the function of expressive speech, and the average value on the MoCA scale were found. For the VD II, in contrast to the VD I, it is characteristic by a decrease in the function of reciprocal coordination, modality-specific working memory (visual figurative), an increase in the latency of peaks N11 and N13 and the averaged 12-lead DC-potential level.

**Limitations.** The study is limited due to the lack of results from a study of the impact of local vibration on cerebral hemodynamics and a brief description of working conditions.

**Conclusion.** This study demonstrates the importance of diagnosing changes in the functional activity of the brain depending on the severity of VD. The identified pathophysiological changes expand our understanding of the role of central regulatory mechanisms in the course of occupational disease progression and can be used to monitor the development of disorders in the functional state of the central nervous system.

**Keywords:** vibration disease; functional brain activity; DC-potential level; somatosensory evoked potentials; neuropsychological testing; differential diagnostics

**Compliance with ethical standards.** The study was approved by the Local Ethics Committee (LEC) of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research (conclusions of LEC No. 3 of 02/16/2021 and No. 5 of 03/21/2023) and carried out in accordance with the ethical standards of the World Association of

*Medical Researchers' Declaration of Helsinki: "Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects" (as amended in 2024). All participants gave informed voluntary written consent to participate in the study.*

**For citation:** Shevchenko O.I., Lakhman O.L., Slivnitsyna N.V., Rusanova D.V. Changes in the functional activity of the brain depending on the severity of vibration disease caused by exposure to local vibration. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 982–986. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-982-986> <https://elibrary.ru/vlyxus> (In Russ.)

**For correspondence:** Oksana I. Shevchenko, e-mail: oich68@list.ru

**Contribution:** Shevchenko O.I. — concept and design of the study, compilation and analysis the data of the general database, collected data on the NEC and neuropsychological examination, writing text, structuring the article; Lakhman O.L. — the concept of the study, editing; Slivnitsyna N.V. — collection and analysis the clinical data; Rusanova D.V. — collection the SSSP data. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: April 17, 2026 / Revised: June 23, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Благодаря оптимизации комплекса медико-профилактических мероприятий уровень профессиональной заболеваемости в Российской Федерации в 2024 г. по сравнению с 2015 г. снизился на 46,06% (0,89 и 1,65 на 10 000 обследованных соответственно). При этом в 2024 г. в группе профессиональных болезней, связанных с воздействием производственных физических факторов, на долю ВБ приходилось 44,28%. Работники горнодобывающих, обрабатывающих, авиастроительных предприятий подвергались приоритетному воздействию локальной вибрации, являющейся причиной возникновения и развития ВБ. Согласно данным государственного доклада (2024), ВБ, обусловленная воздействием локальной вибрации, преимущественно зарегистрирована в таких профессиональных группах, как проходчики, горнорабочие очистного забоя, сборщики-клепальщики, электрослесари подземные [1].

В результате многолетних исследований установлено, что прогрессирующее снижение афферентной иннервации, вибрационного восприятия, накопление следствий этого патологического процесса способствуют формированию функциональных нарушений центральной нервной системы (ЦНС) в виде вегетативной, гемодинамической и когнитивной дисфункций, дезорганизации показателей биоэлектрической активности с признаками дисфункции лобно-подкоркового пути, соединяющего отдельные участки коры лобной доли, ядра зрительных бугров, субталамические ядра, структуры полосатого тела, гипоталамуса, миндалевидного тела [2–7].

Стрессорное воздействие профессиональной локальной вибрации на функциональное состояние структур головного мозга (ГМ) приводит к расстройству нейрогенной регуляции вегетативных функций как центрального, так и периферического характера и проявляется, как правило, полисистемной соматической патологией (сердечно-сосудистой, дыхательной, желудочно-кишечной, половой, вегетативно-трофической), нарушениями эмоционально-личностной и когнитивной сфер [2, 8–10]. Сотрудниками ФГБНУ ВСИМЭИ были установлены признаки нарушения функциональной активности ГМ при ВБ, обусловленной воздействием локальной вибрации, проявляющиеся дезорганизацией биоэлектрической активности [11], нарушением проведения нервных импульсов по восходящим соматосенсорным путям, функций мышления, памяти, пальцевого гнозиса [3].

При постановке диагноза ВБ обычно опираются на характеристики, отражающие специфическое звено патогенеза: выявляют гипоалгезию в зоне иннервации периферических нервов дистальных отделов верхних конечностей, применяют термометрию, тепловидение, холодовые пробы, капилляроскопию, лазерную доплеровскую флоуметрию, реовазографию, ультразвуковую доплерографию, альгезиметрию, паллестезиометрию, электронейромиографию, количественное сенсорное тестирование, УЗИ суставов, рентгенографию, КТ и МРТ суставов и позвоночника [12, 13]. При оценке степени выраженности клинических проявлений ВБ выделяют следующие степени: 0 (нулевая) — доклинические проявления ВБ; I (первая) — начальные про-

явления ВБ; II (вторая) — умеренные проявления ВБ [14]. Однако из-за полиморфной клинической картины ВБ возникают диагностические ситуации, в которых существующие подходы не позволяют определить роль нарушений функциональной активности ГМ в формировании нейро-сенсорного конфликта при начальной (I ст.) и умеренной (II ст.) степени ВБ. Данный факт обосновывает необходимость разработки критериев диагностики, отражающих неспецифическое звено патогенеза ВБ — центральные механизмы регуляции в динамике развития болезни, для различения степени выраженности ВБ. Анализ результатов, полученных при нейрофизиологическом и нейропсихологическом обследовании, позволит определить роль функционального кумулятивного эффекта воздействия профессиональной локальной вибрации в развитии нарушений ЦНС в зависимости от степени выраженности ВБ.

*Цель исследования* — оценить состояние функциональной активности мозга в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни, обусловленной воздействием локальной вибрации.

## Материалы и методы

Согласно поставленной цели, при поступлении в клинику до проведения лечения в условиях стационара обследованы пациенты ( $n = 81$ ), которых разделили на группы в зависимости от степени выраженности вибрационной болезни (ВБ), обусловленной воздействием локальной вибрации. Первая группа состояла из пациентов с начальной степенью (I ст.) ВБ (ВБ I ст.,  $n = 30$ , средний возраст на момент обследования составил  $46,7 \pm 7,3$  года, средний стаж работы в профессии —  $17,3 \pm 3,9$  года). Вторая группа — с умеренной степенью (II ст.) ВБ (ВБ II ст.,  $n = 51$ , средний возраст на момент обследования составил  $44,6 \pm 5,9$  года, средний стаж работы в профессии —  $19,5 \pm 4,3$  года). В первую группу (ВБ I ст.) вошли сборщики-клепальщики (78,6% случаев), слесари механосборочных работ (1,9% случаев), слесари по изготовлению и доводке деталей летательных аппаратов (3,9% случаев), проходчики (7,9% случаев), крепильщики (3,9% случаев), вальщики леса (1,9% случаев) и рамщики (1,9% случаев). Во вторую группу (ВБ II ст.) вошли сборщики-клепальщики (81,3% случаев), слесари механосборочных работ (4,6% случаев), слесари по изготовлению и доводке деталей летательных аппаратов (3,2% случаев), проходчики (7,8% случаев), крепильщики (1,6% случаев) и горнорабочие очистного забоя (1,5% случаев). Условия труда на исследуемых рабочих местах относились к 3.2–3.3 классам по степени вредности и опасности, характеризовались повышенной тяжестью и напряженностью рабочего процесса. Измеренный уровень локальной вибрации на этих участках достигал значений выше 126 децибел. Кроме того, эквивалентные уровни производственного шума за рабочую смену превышали установленные санитарные нормы на величину от 4 до 12,2 дБА. Критериями включения в группы было установление диагноза ВБ во время работы в контакте с вредным производственным фактором, отсутствие экспозиции вибрацией на момент исследования и зарегистрированного медленно прогрессирующего снижения слуха по типу хро-

**Частота встречаемости основных синдромов в зависимости от степени выраженности ВБ, обусловленной воздействием локальной вибрации, на 100 обследованных (%)****Main syndromes and their prevalence depending on the severity of VD due to exposure to local vibration per 100 examined cases (%)**

| Синдромы / Syndromes                                                                                                         | ВБ I ст.<br>VD I degree<br><i>n</i> = 30 | ВБ II ст.<br>VD II degree<br><i>n</i> = 51 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Вегетативно-сенсорная полинейропатия: / Autonomic sensory polyneuropathy:                                                    | 100                                      | 100                                        |
| нерезко выраженная на верхних конечностях / indistinctly expressed on the upper extremities                                  | 23.52*                                   | 0                                          |
| полинейропатия верхних конечностей без степени выраженности<br>polyneuropathy of the upper extremities without severity      | 29.41                                    | 1.56*                                      |
| умеренно выраженная на верхних конечностях / moderately pronounced on the upper extremities                                  | 47.05                                    | 98.36*                                     |
| Периферический ангиодистонический синдром верхних конечностей<br>Peripheral angio-dystonic syndrome of the upper extremities | 35.33                                    | 96.15*                                     |
| Приступы акроангиоспазма пальцев рук / Attacks of acroangiospasm of the fingers                                              | 0                                        | 3.92*                                      |
| Остеоартроз локтевых, лучезапястных суставов / Osteoarthritis of the elbow and wrist joints                                  | 0                                        | 7.81*                                      |
| Трофические нарушения на кистях / Trophic disorders on the hands                                                             | 0                                        | 3.12*                                      |

Примечание. \* — различия между показателями статистически значимы,  $p = 0,01$ .Note: \* — differences between indicators are statistically significant,  $p = 0.01$ .

нической нейросенсорной тугоухости. Критериями исключения были наличие коморбидной патологии, которая могла бы повлиять на результаты исследования функциональной активности ГМ (субфебрильное состояние; наличие в анамнезе болезней и травм ГМ, приводящих к изменению показателей УПП, ССВП, нейропсихологического тестирования; побочное действие лекарственных препаратов; наличие хронических болезней системы кровообращения, приводящих к гемодинамически значимым изменениям реактивности церебральных сосудов).

Состояние афферентных путей от дистального отдела нервного ствола до соматосенсорной зоны коры ГМ оценивали посредством регистрации ССВП, стимулируя срединный нерв в области запястья. Использовали миограф «Нейро-ЭМГ-Микро» фирмы «Нейрософт» (Россия, Иваново). Анализировали показатели латентности компонентов N9, N10, N11, N13, N18, N20, P25, N30 и межпиковых интервалов N10–N13, N11–N13, N13–N18, N18–N20, N13–N20 [15]. УПП, являющийся по своему происхождению сосудистым потенциалом и отражающий особенности энергозатрат, связанных с функциональным состоянием головного мозга, нервной системы в целом, определяли методом нейрорезергокартирования (НЭК) [16]. Исследования проводили на аппаратно-программном комплексе для топографического картирования электрической активности «Нейро-КМ» (ТУ 9442-001-28910376-2008, регистрационное удостоверение № ФСР 2009/05370, сертификат соответствия № РОСС RU.0001.11ИМ25, Россия, Москва) при 12-канальном отведении. Активные неполяризуемые хлорсеребряные электроды устанавливали на голове по схеме  $10 \times 20$ , пассивный электрод — на запястье ведущей руки. Рассчитывали интегральный уровень интенсивности энергетического обмена по 12 отделам для каждого испытуемого с помощью усредненного УПП  $X_{\text{ср}}$  [16, 17]. Для оценки интеллекта, памяти, праксиса, гнозиса применяли нейропсихологические тесты из схемы А.Р. Лурии, которые подробно описаны нами в предыдущих работах [7, 18]. Для скрининга когнитивных нарушений использовали Монреальскую когнитивную шкалу (MoCA, от англ. Montreal Cognitive Assessment) [19]. Информацию обрабатывали с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office 2003 (в ОС Windows XP), программных средств Microsoft Excel, статистического программного обеспечения Jamovi (version 2.3). Проверку нормальности распределения выполняли с использованием критерия Шапиро — Уилкса. Результаты исследований отображены в виде медианы ( $Me$ ), верхнего и нижнего квартилей ( $Q_1$ – $Q_3$ ), среднего ( $M$ ), стандартного отклонения ( $\sigma$ ).

Различия между количественными показателями в независимых выборках доказывали с помощью  $U$ -критерия Манна — Уитни. Статистическую значимость различий показателей, выраженных в процентах, вычисляли по методу углового преобразования Фишера. Для выявления среди полученных в ходе исследования наиболее информативных показателей использовали многофакторный дискриминантный анализ. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключения ЛЭК № 3 от 16.02.2021 г. и № 5 от 21.03.2023 г.) и выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (с поправками 2024 г.), не ущемляло прав и не подвергало опасности благополучие субъектов исследования, проведено с их согласия.

## Результаты

Клиническая картина ВБ характеризовалась полиморфностью клинической симптоматики, зависящей от степени выраженности профессиональной болезни (см. таблицу). Преобладающие жалобы пациентов с ВБ I ст.: онемение, слабость и боли в руках, нарушения сна, зябкость пальцев на холоде. У пациентов с ВБ II ст. наряду с перечисленными выше жалобами отмечали побеление пальцев рук на холоде, ограничение подвижности и болезненность локтевых суставов.

В таблице представлены основные синдромы и частота их встречаемости в зависимости от степени выраженности ВБ. Для ВБ I ст. были характерны нейрососудистые нарушения рук и (или) незначительно выраженная сенсорная или вегетативно-сенсорная полинейропатия. При ВБ II ст. дополнительно отмечались приступы ангиоспазма пальцев рук, остеоартроз с различной степенью выраженности функциональной недостаточности, трофические нарушения в руках.

При сравнении медианных значений УПП и ССВП обеих групп отмечено, что у лиц с ВБ II ст. значимо повышался показатель УПП по правому центральному отведению Cd [17,5 (13,1–24,3) и 27,1 (17–32,3) мкВ при  $p = 0,006$  соответственно], возрастал латентный период компонентов N9 [8,7 (8,4–9) и 9,2 (8,6–9,8),  $p = 0,01$  соответственно], N10 [10,2 (10–10,6) и 10,6 (10,2–11,2),  $p = 0,002$  соответственно] и P25 [23,7 (23,1–24,9) и 25 (23,6–26),  $p = 0,008$  соответственно]. Кроме того, у пациентов с ВБ II ст. наиболее уязвимой оказалась функция экспрессивной речи (тест

на повторение дизъюнктивных пар звуков и оппозиционных фонем) при сопоставлении с таковой у пациентов с ВБ I ст. [0 (0–1) и 1,5 (1–2) балла при  $p = 0,03$  соответственно], характеризующая низкий спонтанный компенсаторный потенциал ГМ в правом полушарии и (или) подкорковом уровне. Статистически значимое снижение значения по шкале МоСА [25 (23–26) и 23 (22–24) балла при  $p = 0,04$  соответственно] указывало на негативную динамику легко выраженной когнитивной дисфункции по мере увеличения степени выраженности ВБ.

Применение дискриминантного анализа позволило выделить признаки нарушения нейрофункциональной активности в зависимости от степени выраженности ВБ. При сопоставлении показателей обеих групп получено пять наиболее значимых критериев, при которых  $F$ -включения и уровень достоверности были статистически значимыми: показатели, характеризующие межполушарные двигательные координации (проба Озерского;  $F_{\text{вкл.}} = 15,75$ ;  $p = 0,0004$ ), состояние зрительной образной памяти (тест «Запоминание групп картинок при трёхкратном воспроизведении»;  $F_{\text{вкл.}} = 4,91$ ;  $p = 0,03$ ), время постсинаптической активации задних рогов спинного мозга (латентность компонентов N11 и N13;  $F_{\text{вкл.}} = 5,42$  и  $5,68$ ;  $p = 0,02$  и  $0,02$  соответственно), а также средний по 12 отведениям УПП (УПП  $X_{\text{ср.}}$ ;  $F_{\text{вкл.}} = 4,57$ ;  $p = 0,03$ ), отражающий уровень интенсивности энергетических процессов в мозге. Наибольшая чувствительность установлена у показателя пробы Озерского, связанного с состоянием межполушарных отношений ГМ (двигательных координаций). Совокупность полученных признаков позволяет отслеживать развитие симптомов функциональных нарушений ЦНС у пациентов в зависимости от степени выраженности ВБ, обусловленной воздействием локальной вибрации.

## Обсуждение

Поскольку работники горнодобывающих, обрабатывающих, авиастроительных предприятий подвергаются приоритетному воздействию локальной вибрации, являющейся профессиональным стрессором и причиной возникновения и развития ВБ, очевидна необходимость дальнейшего изучения как специфического, так и неспецифического звеньев патогенеза ВБ — центральных механизмов регуляции в динамике развития болезни. Анализ данных клинического исследования степени выраженности ВБ выявил у пациентов с ВБ II ст. по сравнению с группой с ВБ I ст. статистически значимое увеличение частоты диагностируемых показателей: умеренно выраженной вегетативно-сенсорной полинейропатии и периферического ангиодистонического синдрома верхних конечностей, приступов акроангиоспазма пальцев рук, остеоартроза локтевых, лучезапястных суставов, трофических нарушений кистей. Несмотря на отсутствие явных признаков патологии ЦНС в клинической картине ВБ, в исследованиях показано, что у пациентов с ВБ присутствовали функциональные неврологические расстройства, проявлявшиеся неврозоподобной реакцией с вегетативной дисфункцией, когнитивными и гемодинами-

ческими нарушениями ГМ, ретинопатией, демиелинизацией нервных волокон [2, 3, 5, 7, 11, 20]. Данные нарушения закономерны, так как афферентные сигналы периферической нервной системы провоцируют рефлекторные реакции в нейронах спинного мозга, симпатических узлах, ретикулярной формации, промежуточном мозге, коре больших полушарий ГМ [21].

В нашем исследовании установлено, что при увеличении степени выраженности ВБ ухудшается состояние функциональной деятельности ГМ. У пациентов с ВБ II ст. выявлено усиление функциональных церебральных проблем, проявляющихся в виде повышения энергетического обмена в центральной области правого полушария, ухудшения экспрессивности речи, снижения среднего значения по шкале МоСА, нарушения проведения импульса по афферентным проводящим структурам до соматосенсорной зоны коры ГМ (возрастание латентности компонента P25).

Итоги работы демонстрируют, что для ВБ II ст. характерны в отличие от ВБ I ст. нарушения реципрокной координации, модально-специфической оперативной памяти (зрительной образной), постсинаптической активации задних рогов спинного мозга (латентность пиков N11 и N13), среднего по 12 отведениям УПП. Аналогичные изменения, по данным литературы [15, 16, 22], могут быть сопряжены с дисфункцией мозолистого тела и других межполушарных проводящих структур, затылочной доли (ассоциативной области) левого полушария, изменением скорости проведения нервного импульса по миелинизированным волокнам восходящих проводящих путей ЦНС, усилением церебрального энергетического обмена. Результаты работы подчёркивают важность диагностики изменений функциональной активности ГМ в зависимости от степени выраженности ВБ, а выявленные патофизиологические изменения расширяют понимание роли центральных механизмов регуляции в динамике прогрессирования профессиональной патологии.

**Ограничения исследования** обусловлены отсутствием регистрации показателей церебральной гемодинамики при проведении ультразвуковой доплерографии, краткой характеристикой условий труда.

## Заключение

С увеличением степени выраженности ВБ, обусловленной воздействием локальной вибрации, усугубляются нарушения церебрального энергетического обмена (по НЭК) в центральной области правого полушария и в подкорковых церебральных структурах (патологическое повышение УПП); демиелинизирующие изменения в нервных волокнах плечевого сплетения (возрастание латентного периода пиков N9, N10), нарушения активности нейронов соматосенсорной зоны (увеличение латентности компонента P25); прогрессирование когнитивной дисфункции. Наиболее значимыми функциональными признаками нарушения нейрофункциональной активности при ВБ II ст., обусловленной воздействием локальной вибрации, являются реципрокная координация, зрительная образная память, латентность компонентов N11 и N13, интегральный показатель УПП.

## Литература

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году». М.: 2025.
2. Трошин В.В., Морозова П.Н. Роль цереброваскулярной патологии и системная профилактика вибрационной болезни у работающих в машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности. *Здоровье населения и среда обитания* — *ЗНУСО*. 2015; (1): 24–7. <https://elibrary.ru/tqmidl>
3. Шевченко О.И., Лахман О.Л., Русанова Д.В. Оценка функциональной активности у пациентов с вибрационной болезнью, связанной с воздействием локальной вибрации. *Медицина труда и промышленная экология*. 2023; 63(11): 709–14. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-709-714> <https://elibrary.ru/brfvcsc>
4. Шпагина Л.А., Герасименко О.Н., Новикова И.И., Радоуцкая Е.Ю., Горбунова А.М., Сергеева Я.С. Клинико-функциональная и молекулярная характеристика вибрационной болезни в сочетании с артериальной гипертензией. *Медицина труда и промышленная экология*. 2022; 62(3): 146–58. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-3-146-158> <https://elibrary.ru/cnluqw>
5. Куприна Н.И., Шилов В.В., Улановская Е.В. Особенности ультразвукового исследования периферического ангиодистонического синдрома при вибрационной болезни I стадии от локальной вибрации. *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*. 2020; 15(1): 581–8. <https://elibrary.ru/aepkrx>
6. Дьякович М.П., Рукавишников В.С., Панков В.А., Лахман О.Л., Кулешова М.В. Обоснование использования показателей неспецифического звена патогенеза и дозы воздействия локальной вибрации при прогнозировании риска развития вибрационной болезни. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(10): 1049–55. <https://elibrary.ru/zoalal>
7. Шевченко О.И., Лахман О.Л. Нейропсихологические критерии диагностики когнитивных нарушений у пациентов с профессиональными заболеваниями от воздействия физических факторов. *Acta Biomedica Scientifica*. 2022; (7): 164–72. <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7.5-2.17> <https://elibrary.ru/zqttug>
8. Швалев О.В., Колесова Е.Б., Федорова С.Б. Современные аспекты патогенеза вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*.

- 2019; 59(9): 807. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-807-808> <https://elibrary.ru/ksfckj>
9. Бабанов С.А., Азовскова Т.А., Вакурова Н.В., Бараева Р.А. Модификация классификационных представлений о вибрационной болезни и современные дефиниции. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии*. 2019; (3): 44–8. <https://elibrary.ru/iyankj>
  10. Кулешова М.В. Влияние вибрации на психологическое здоровье работающих. *Медицина труда и промышленная экология*. 2023; 63(1): 47–52. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-1-47-52> <https://elibrary.ru/txnij>
  11. Катаманова Е.В., Сливнищина Н.В., Нурбаева Д.Ж. Топографическое картирование ЭЭГ при воздействии физических и химических производственных факторов. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(9): 86–7. <https://elibrary.ru/zfqjtp>
  12. Бабанов С.А., Азовскова Т.А., Киришина Т.М., Лотков В.С., Агаркова А.С., Безшанова А.Е. и др. Вибрационная болезнь: эволюция классификационных представлений, диагностика, вопросы экспертизы. *Врач*. 2023; 34(4): 11–7. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-04-02> <https://elibrary.ru/ezyljk>
  13. Ямщикова А.В., Гидаятова М.О., Флейшман А.Н., Кунгурова А.А. Анализ поражения периферической нервной системы при вибрационной болезни. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(7): 765–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-7-765-769> <https://elibrary.ru/jscnrm>
  14. Боденкова Г.М., Дунаева С.А., Еремеев Р.Б., Катаманова Е.В., Кулаева И.В., Лагутина Г.Н. и др. Профессиональные заболевания нервной и скелетно-мышечной систем: национальное руководство. В кн.: *Профессиональная патология: Национальное руководство*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2024: 417–516. <https://elibrary.ru/tmpktu>
  15. Николаев С.Г. *Электронейромиография: клинический практикум*. Иваново: ПресСто; 2019.
  16. Фокин В.Ф., Пономарева Н.В. *Энергетическая физиология мозга*. М.: Антидор; 2003. <https://elibrary.ru/yucorb>
  17. Фокин В.Ф., Пономарева Н.В. Способ оценки энергетического состояния головного мозга. Патент РФ № 2135077С1; 2019.
  18. Шевченко О.И., Лакхман О.Л., Катаманова Е.В., Русанова Д.В., Пятков Ю.С., Кодинец И.Н. Оценка взаимоотношений показателей, характеризующих нейрофункциональную активность при вибрационной болезни. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(11): 1341–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1341-1346> <https://elibrary.ru/swqpxd>
  19. Комиссарова Н.В., Бывальцева В.П., Мичурина М.А., Газизова Г.И., Кашапова А.Р. Оценка когнитивных функций по шкале MoCA у пациентов эндокринологического и кардиологического профиля. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье*. 2021; (2): 106–12. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2021.2.CLIN.10> <https://elibrary.ru/ciwvyv>
  20. Малышева С.С., Петров С.А. Связь микроциркуляции сосудов сетчатки органа зрения с общей гемодинамикой у лиц с вибрационной болезнью. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (3): 186. <https://elibrary.ru/tysjep>
  21. Русанова Д.В., Сливнищина Н.В., Лакхман О.Л. Изменения состояния нервной системы у пациентов с вибрационной болезнью. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(9): 934–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-934-940> <https://elibrary.ru/wtdzvu>
  22. Корсакова Н.К., Москвичихута Л.И. *Клиническая нейропсихология*. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт; 2025.

## References

1. The State report «On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2024». Moscow; 2025. (in Russian)
2. Troshin V.V., Morozova P.N. Role of cerebrovascular pathology. Systemic prevention of vibration disease in workers of engineering and metal-working industries. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO*. 2015; (1): 24–7. <https://elibrary.ru/tqmidl> (in Russian)
3. Shevchenko O.I., Lakhman O.L., Rusanova D.V. Assessment of neurofunctional activity in patients with vibration disease caused of local vibration. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2023; 63(11): 709–14. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-709-714> <https://elibrary.ru/brfvsc> (in Russian)
4. Shpagina L.A., Gerasimenko O.N., Novikova I.I., Radoutskaia E.Yu., Gorbunova A.M., Sergeeva Ya.S. Clinical, functional and molecular characteristics of vibration disease in combination with arterial hypertension. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2022; 62(3): 146–58. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-3-146-158> <https://elibrary.ru/cnlqwg> (in Russian)
5. Kuprina N.I., Shilov V.V., Ulanovskaya E.V. Ultrasound features of peripheral angiodystonic syndrome in vibration disease stage 1 due to local vibration. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya*. 2020; 15(1): 581–8. <https://elibrary.ru/aepkrx> (in Russian)
6. Dyakovich M.P., Rukavishnikov V.S., Pankov V.A., Lakhman O.L., Kuleshova M.V. The rationale for the use of indices of a non-specific link of pathogenesis and the dose of local vibration when predicting the risk of developing a vibrational disease. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(10): 1049–55. <https://elibrary.ru/zoalal> (in Russian)
7. Shevchenko O.I., Lakhman O.L. Neuropsychological criteria for diagnosing cognitive impairment in patients with occupational diseases caused by physical factors. *Acta Biomedica Scientifica*. 2022; (7): 164–72. <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7.5-2.17> <https://elibrary.ru/zqttug> (in Russian)
8. Shvalev O.V., Kolesova E.B., Fedorova S.B. Modern aspects of the pathogenesis of vibration disease. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2019; 59(9): 807. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-807-808> <https://elibrary.ru/ksfckj> (in Russian)
9. Babanov S.A., Azovskova T.A., Vakurova N.V., Barayeva R.A. Modification of classification ideas about vibration disease and modern definitions. *Vestnik neurologii, psikiatrii i neirokhirurgii*. 2019; (3): 44–8. <https://elibrary.ru/iyankj> (in Russian)
10. Kuleshova M.V. Impact of vibration on the workers' psychological health. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2023; 63(1): 47–52. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-1-47-52> <https://elibrary.ru/txnij> (in Russian)
11. Katamanova E.V., Slivnitsina N.V., Nurbaeva D.Zh. Topographic EEG mapping under exposure to physical and chemical occupational factors. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2017; 57(9): 86–7. <https://elibrary.ru/zfqjtp> (in Russian)
12. Babanov S.A., Azovskova T.A., Kiryushina T.M., Lotkov V.S., Agarkova A.S., Bezshanova A.Ye., et al. Vibration disease: evolution of classification views, diagnosis, problems of examining. *Vrach*. 2023; 34(4): 11–7. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-04-02> <https://elibrary.ru/ezyljk> (in Russian)
13. Yamshechikova A.V., Gidayatova M.O., Fleishman A.N., Kungurova A.A. Analysis of disorders of the peripheral nervous system in vibration disease. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(7): 765–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-7-765-769> <https://elibrary.ru/jscnrm> (in Russian)
14. Bodienkova G.M., Dunaeva S.A., Eremeev R.B., Katamanova E.V., Kudayeva I.V., Lagutina G.N., et al. Occupational diseases of the nervous and musculoskeletal systems: national guidelines. In: *Occupational Pathology: National Guidelines [Professional'naya patologiya: Natsional'noe rukovodstvo]*. 2<sup>nd</sup> ed., revised and add. Moscow: GEOTAR-Media; 2024: 417–516. <https://elibrary.ru/tmpktu> (in Russian)
15. Nikolaev S.G. *Electroneuromyography: Clinical Practice [Elektro-neiromiografiya: klinicheskii praktikum]*. Ivanovo: PresSto; 2019. (in Russian)
16. Fokin V.F., Ponomareva N.V. *Energy Physiology of the Brain [Energeticheskaya fiziologiya mozga]*. Moscow: Antidor; 2003. (in Russian)
17. Fokin V.F., Ponomareva N.V. A method for assessing the energy state of the brain. Patent RF № 2135077C1; 2019. (in Russian)
18. Shevchenko O.I., Lakhman O.L., Katamanova E.V., Rusanova D.V., Pyatkov Yu.S., Kodinets I.N. Evaluation of the interrelationships of indicators characterizing neurofunctional activity in vibration disease. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(11): 1341–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1341-1346> <https://elibrary.ru/swqpxd> (in Russian)
19. Komissarov N.V., Byvaltseva V.P., Michurin M.A., Gazizova G.I., Khashapova A.R. Assessment of cognitive functions on the MoCA scale in patients with endocrinological and cardiologic profiles. *Vestnik meditsinskogo instituta «REAVIZ». Reabilitatsiya, Vrach i Zdorov'e*. 2021; (2): 106–12. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2021.2.CLIN.10> <https://elibrary.ru/ciwvyv> (in Russian)
20. Malysheva S.S., Petrov S.A. Communication of microcirculation of vessels of a retina of an organ of vision with the general haemodynamic at patients with a vibration illness. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015; (3): 186. <https://elibrary.ru/tysjep> (in Russian)
21. Rusanova D.V., Slivnitsina N.V., Lakhman O.L. Alterations of the nervous system in patients with vibration disease. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(9): 934–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-934-940> <https://elibrary.ru/wtdzvu> (in Russian)
22. Korsakova N.K., Moskvichyute L.I. *Clinical Neuropsychology [Klinicheskaya neipsikhologiya]*. 2<sup>nd</sup> ed., corrected and add. Moscow: Yurait; 2025. (in Russian)

## Сведения об авторах

**Шевченко Оксана Ивановна**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. профессиональной и экологически обусловленной патологии ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: oich68@list.ru

**Лакхман Олег Леонидович**, доктор мед. наук, профессор, профессор РАН, директор ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: lakhman\_o\_1@mail.ru

**Сливнищина Наталья Валерьевна**, канд. мед. наук, зав. неврологическим отделением ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: knvspi@mail.ru

**Русанова Дина Владимировна**, доктор биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. профессиональной и экологически обусловленной патологии ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: dina.rusanova@yandex.ru

## About the authors

**Oksana I. Shevchenko**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of the professional and ecologically caused pathology, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4842-6791> E-mail: oich68@list.ru

**Oleg L. Lakhman**, DSc (Medicine), director, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0013-8013> E-mail: lakhman\_o\_1@mail.ru

**Natalya V. Slivnitsyna**, PhD (Medicine), head, Neurology Department, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8984-2452> E-mail: knvspi@mail.ru

**Dina V. Rusanova**, DSc (Biology), senior researcher, Laboratory of the professional and ecologically caused pathology, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1355-3723> E-mail: dina.rusanova@yandex.ru



Газимова В.Г.<sup>1</sup>, Созонова Т.В.<sup>1</sup>, Гурвич В.Б.<sup>1</sup>, Альшиц Е.А.<sup>2</sup>, Шастин А.С.<sup>1</sup>,  
Кузьмин Д.В.<sup>1</sup>, Иващенко М.А.<sup>1</sup>

## Межведомственный регистр лиц с профессиональными заболеваниями: интеграция данных для сохранения трудового потенциала

<sup>1</sup>ФБУН «Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup>Отделение Фонда пенсионного и социального страхования Российской Федерации по Свердловской области, 620000, Екатеринбург, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Профессиональная заболеваемость является интегральным индикатором реализованного профессионального риска и эффективности мер профилактики. Её прогностическая значимость напрямую зависит от полноты и достоверности данных. Однако сложившаяся в Российской Федерации многоэтапная и многоканальная система учёта профессиональных заболеваний (ПЗ) снижает полноту и достоверность учёта, порождает расхождения между медицинской и страховой статистикой.

**Цель исследования** — совершенствование системы учёта лиц с ПЗ в Свердловской области путём разработки архитектуры межведомственного регистра для динамического наблюдения, анализа эффективности лечения, реабилитации и оценки исходов случаев заболеваний.

**Материалы и методы.** Материалом исследования послужили данные регионального регистра центра профпатологии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (региональный регистр), Отделения Социального фонда России (Социальный фонд), медицинских организаций Свердловской области (МО). Проведён анализ документооборота и существующих логистических схем взаимодействия между центрами профпатологии, МО, Роспотребнадзором и Социальным фондом. Сопоставлялись данные регионального регистра о подтверждённых случаях ПЗ, Социального фонда о страховых выплатах пациентам вследствие ПЗ, МО о пациентах с установленными ПЗ, состоящих на диспансерном учёте.

**Результаты.** Существующая система учёта ПЗ характеризуется множественностью точек регистрации, фрагментарностью данных, отсутствием сквозного сопровождения пациента и ограниченной межведомственной обратной связью, что приводит к существенным статистическим расхождениям между различными контурами учёта.

**Ограничения исследования.** Исследование ограничено отсутствием единых форматов и обязательной маршрутизации данных о пациентах с ПЗ между медицинскими, страховыми и надзорными организациями.

**Заключение.** Разработка и внедрение межведомственного регистра позволит повысить полноту и достоверность статистического учёта случаев ПЗ, обеспечить непрерывное сопровождение пациента от этапа установления диагноза до оценки исходов и реабилитации, создать основу для принятия управленческих решений, направленных на сохранение трудового потенциала работающего населения.

**Ключевые слова:** профессиональные заболевания; межведомственный регистр; центр профпатологии; статистика

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует заключения этического комитета.

**Для цитирования:** Газимова В.Г., Созонова Т.В., Гурвич В.Б., Альшиц Е.А., Шастин А.С., Кузьмин Д.В., Иващенко М.А. Межведомственный регистр лиц с профессиональными заболеваниями: интеграция данных для сохранения трудового потенциала. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 987–991. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-987-991> <https://elibrary.ru/yjtkck>

**Для корреспонденции:** Газимова Венера Габдрахмановна, e-mail: [venera@ymrc.ru](mailto:venera@ymrc.ru)

**Вклад авторов:** Газимова В.Г. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Созонова Т.В. — сбор материала, обработка данных, написание текста, редактирование; Гурвич В.Б. — написание текста, редактирование; Альшиц Е.А. — подготовка материала, редактирование; Шастин А.С. — подготовка материала и обработка данных; Кузьмин Д.В., Иващенко М.А. — сбор материала, обработка данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 18.06.2026 / Поступила после доработки: 21.07.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Venera G. Gazimova<sup>1</sup>, Tatyana V. Sozonova<sup>1</sup>, Vladimir B. Gurvich<sup>1</sup>, Elena A. Alshits<sup>2</sup>,  
Aleksandr S. Shastin<sup>1</sup>, Dmitry V. Kuzmin<sup>1</sup>, Maxim A. Ivashchenko<sup>1</sup>

## Interdepartmental occupational disease registry: data integration for maintaining labor potential

<sup>1</sup>Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation;

<sup>2</sup>Sverdlovsk Region Branch of the Social Fund of Russia, Yekaterinburg, 620000, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Occupational disease incidence is an integral indicator of the realized occupational risk and efficiency of prevention, the prognostic value of which strongly depends on data completeness and reliability. Yet, the current multi-stage and multi-channel Russian system for occupational disease registration reduces the completeness and trustworthiness of records and creates discrepancies between medical and insurance statistics.

**The purpose of the study** is to improve the system for registering occupational disease cases in the Sverdlovsk Region by developing architecture of an interdepartmental registry for dynamic surveillance, analysis of effectiveness of treatment and rehabilitation, and evaluation of disease outcomes.

**Materials and Methods.** The materials of the study included data from the Regional Registry of the Occupational Health Center at the Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (Regional Registry), the Sverdlovsk Region Branch of the Social Fund of Russia (Social Fund), and health facilities of the Sverdlovsk Region. We analyzed the document flow and logistics between occupational health centers, health facilities,

offices of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Rosпотребнадзор), and the Social Fund. We also compared data from the Regional Registry of confirmed occupational disease cases with those of the Social Fund and health facilities on insurance payments and followed-up patients with occupational diseases, respectively.

**Results.** The current system for occupational disease surveillance is characterized by multiple registration points, fragmented data, a lack of end-to-end patient support, and limited interdepartmental feedback, all leading to significant statistical discrepancies.

**Limitations.** The study is limited due to the lack of common formats and mandatory routing of data on occupational diseases between medical, insurance, and surveillance authorities.

**Conclusion.** The development and setting up of a single interdepartmental registry will improve the completeness and reliability of statistics on occupational diseases, ensure continuous patient support from diagnosis to outcome assessment and rehabilitation, and create a basis for management decisions aimed at maintaining the labor potential of the working population.

**Keywords:** occupational diseases; interdepartmental registry; Occupational Health Center; statistics

**Compliance with ethical standards.** Not applicable.

**For citation:** Gazimova V.G., Sozonova T.V., Gurvich V.B., Alshits E.A., Shastin A.S., Kuzmin D.V., Ivashchenko M.A. Interdepartmental occupational disease registry: data integration for maintaining labor potential. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 987–991. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-987-991> <https://elibrary.ru/yjtckc> (In Russ.)

**For correspondence:** Venera G. Gazimova, e-mail: [venera@ymrc.ru](mailto:venera@ymrc.ru)

**Contribution:** *Gazimova V.G.* — study conception and design, draft manuscript preparation and revision; *Sozonova T.V.* — data collection and processing, draft manuscript preparation and revision; *Gurvich V.B.* — draft manuscript preparation and revision; *Alshits E.A.* — data preparation, revision; *Shastin A.S.* — data preparation and processing; *Kuzmin D.V.* — data collection and processing; *Ivashchenko M.A.* — data collection and processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of its final version. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: June 18, 2026 / Revised: July 21, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Профессиональная заболеваемость является интегральным индикатором реализованного профессионального риска и эффективности мер профилактики. Её прогностическая значимость напрямую зависит от полноты и достоверности данных. В Российской Федерации система учёта профессиональных заболеваний (ПЗ) исторически сложилась как многоэтапная и многоканальная. Учёт случаев ПЗ МО осуществляют на основании медицинских заключений о наличии или отсутствии ПЗ<sup>1</sup>, органы Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) — на основании актов о случаях ПЗ<sup>2</sup>, Социальный фонд — по данным учреждений медико-социальной экспертизы (МСЭ) исходя из оценки потери способности к профессиональной деятельности<sup>3,4,5</sup>. Такая модель неизбежно порождает расхождения между медицинской и страховой статистикой, что снижает полноту и достоверность учёта профессиональной заболеваемости, затрудняет оценку реального бремени болезней [1–3]. В результате число пациентов с установленными ПЗ варьирует в зависимости от ведомственной принадлежности.

<sup>1</sup> Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 29.04.2025 г. № 258н «Об утверждении порядка проведения экспертизы связи заболевания с профессией, учётной формы извещения об установлении диагноза — острое (хроническое) профессиональное заболевание, уточнении или отмене диагноза — острое (хроническое) профессиональное заболевание, учётной формы медицинского заключения о наличии или об отсутствии профессионального заболевания, порядка учёта профессионального заболевания органом государственного санитарно-эпидемиологического контроля (надзора), проводившим расследование обстоятельств и причин возникновения у работника профессионального заболевания, формы протокола заседания комиссии по расследованию случая профессионального заболевания».

<sup>2</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 05.07.2022 г. № 1206 «О порядке расследования и учёта случаев профессиональных заболеваний».

<sup>3</sup> Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ.

<sup>4</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 15.05.2006 г. № 286 «Об утверждении Положения об оплате дополнительных расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию застрахованных лиц, получивших повреждение здоровья вследствие несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».

<sup>5</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 16.10.2000 г. № 789 «Об утверждении Правил установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».

Актуальность совершенствования системы учёта в последние годы возрастает в связи с обновлением нормативной базы по профпатологии. В 2025 г. вступили в силу новый перечень ПЗ<sup>6</sup>, порядок проведения экспертизы связи заболевания с профессией, учётные документы, включая унифицированную форму извещения о случаях ПЗ<sup>1</sup>. Одновременно развитие цифровых технологий в здравоохранении, расширение функционала Единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения и накопленный опыт использования медицинских и профессиональных регистров показывают, что персонифицированные информационные системы позволяют повысить полноту и достоверность учёта, обеспечить длительное наблюдение за пациентом, использовать данные регистра для оценки эффективности профилактики, лечения и реабилитации [4–6].

Для промышленно развитых регионов проблема особенно значима. В Свердловской области высок удельный вес работников, занятых во вредных условиях труда (41,9%)<sup>7</sup>, а официально регистрируемая профессиональная заболеваемость остаётся весьма низкой (0,56 на 10 тыс. работающих в 2025 г.)<sup>8</sup>, что косвенно указывает на неполную выявляемость и недоучёт случаев ПЗ. Региональная профпатологическая служба располагает значительным массивом накопленных сведений о пациентах с ПЗ, однако практическое использование этих данных ограничено отсутствием единой межведомственной цифровой среды.

В литературе отмечено, что регистры ПЗ являются одним из наиболее перспективных инструментов интеграции клинических, гигиенических и организационных данных, однако их эффективность определяется полнотой межведомственного взаимодействия, единообразием структуры данных и наличием устойчивой нормативной поддержки [4, 7–12]. Региональный опыт показал практическую реализуемость таких систем (например, создание межведомственного регистра лиц с ПЗ в Красноярском крае), но необходимо чёткое распределение функций между центрами профпатологии, органами надзора, страховщиком и МО [13].

<sup>6</sup> Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 21 марта 2025 г. № 141н «Об утверждении перечня профессиональных заболеваний».

<sup>7</sup> Федеральная служба государственной статистики. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl\\_trud1-2025.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl_trud1-2025.xlsx)

<sup>8</sup> Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Свердловской области в 2025 году».

*Цель исследования* — совершенствование системы учёта лиц с ПЗ в Свердловской области путём разработки архитектуры межведомственного регистра для динамического наблюдения, анализа эффективности лечения, реабилитации и оценки исходов случаев заболеваний.

## Материалы и методы

Материалом исследования послужили данные регионального регистра Свердловской области о 7981 пациенте с установленными профессиональными заболеваниями (9240 случаев за период 2002–2025 гг.). Источниками информации для формирования регионального регистра были извещения об установлении заключительных диагнозов ПЗ, истории болезни пациентов, санитарно-гигиенические характеристики условий труда и акты о случаях ПЗ. Региональный регистр пациентов с профессиональной патологией включал данные о месте работы, профессии, стаже во вредных условиях труда, вредном производственном факторе, действующем на рабочем месте, фактическом уровне данного фактора, классе условий труда, клиническом диагнозе ПЗ, группе инвалидности, степени утраты профессиональной трудоспособности (УПТ), сопутствующей патологии, наличии вредных привычек и исходах заболеваний.

Исследование имело ретроспективный описательно-аналитический характер с элементами организационного аудита системы межведомственного учёта ПЗ. Наряду с оценкой структуры и наполненности регионального регистра был проведён анализ документооборота и существующих логистических схем взаимодействия между центром профпатологии, МО, Роспотребнадзором и Социальным фондом.

Для формализации межведомственных разрывов сопоставлялись данные регионального регистра о подтверждённых случаях ПЗ, Социального фонда о страховых выплатах пациентам вследствие ПЗ, МО о пациентах с установленными ПЗ, состоящих на диспансерном учёте. Критериями анализа служили полнота поступления документов, последовательность прохождения случая по этапам учёта и наличие обратной связи между ведомствами.

## Результаты

По данным регионального регистра в Свердловской области, по состоянию на 01.01.2026 г. на учёте состоял 7981 пациент с установленным диагнозом ПЗ (9240 случаев). При этом число пациентов с установленными ПЗ, состоящих на учёте в МО области, — 6121. По данным Социального фонда, в 2025 г. страховые выплаты вследствие ПЗ получили 8573 человека.

Согласно региональному регистру, из числа пациентов с установленными ПЗ (7981) только 1287 имели ту или иную степень утраты трудоспособности (16,1%), а 354 пациентам была установлена группа инвалидности (4,4%). При этом 8573 человека получали страховые выплаты вследствие ПЗ, назначение которых невозможно при отсутствии программы реабилитации пострадавшего (ПРП) в результате несчастного случая на производстве и ПЗ.

Функционирующий в ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора региональный регистр включает основные клинические, социальные и производственные характеристики пациента, однако его текущая Excel-реализация соответствует скорее локальной накопительной базе, нежели полноценной межведомственной информационной системе.

Документооборот по профессиональной патологии рассматривался как последовательная цепочка движения информации о пациенте от момента установления заключительного диагноза ПЗ до включения случая заболевания в ведомственные массивы учёта и систему страхового обеспечения. На первом этапе центр профпатологии формирует медицинское заключение и извещение об установлении заключительного диагноза ПЗ, которые в соответствии с законодательными актами<sup>4,2</sup> направляет работодателю,

в МО, направившую работника, Роспотребнадзор и Социальный фонд. На втором этапе работодатель образует комиссию по расследованию случая ПЗ, которая составляет акт о случае ПЗ. На третьем этапе МО по месту прикрепления для медицинского обслуживания направляет пациента в Бюро медико-социальной экспертизы (МСЭ) для медицинского освидетельствования с целью установления степени УПТ, группы инвалидности. После освидетельствования работник обращается в Социальный фонд для назначения страховых выплат. На четвёртом этапе МО осуществляют диспансерное наблюдение за данным пациентом.

Уже на этапе составления акта о случае ПЗ и передачи его в центр профпатологии отмечалась потеря информации об итогах расследования. Из 9240 случаев ПЗ в центр профпатологии вернулись только 2674 (33,5%) утверждённых актов. Полученные результаты согласуются с данными литературы, указывающими на высокую чувствительность статистики профессиональной заболеваемости к особенностям документооборота [1, 2, 14, 15].

Отсутствие системной обратной связи по линии «Центр профпатологии — Социальный фонд — МСЭ» создаёт дополнительное ограничение. Сведения о степени УПТ, группе инвалидности центр профпатологии получает только благодаря ежегодным отчётам от МО по профпатологии или по отдельным запросам в МСЭ. Это ограничивает возможность использования регионального регистра для оценки исходов и мониторинга эффективности реабилитации, хотя именно такие задачи рассматриваются как ключевые для современных медицинских регистров [5, 6].

## Обсуждение

Существующая система учёта ПЗ в Свердловской области характеризуется множественностью точек регистрации, фрагментарностью данных, отсутствием сквозного сопровождения пациента и ограниченной межведомственной обратной связью, что приводит к существенным статистическим расхождениям между различными контурами учёта. Отсутствие автоматизированного обмена данными между центром профпатологии, Роспотребнадзором, МО, Социальным фондом, МСЭ ограничивает полноту сведений о пациентах с профессиональной патологией.

По данным современной литературы, устойчивый регистр ПЗ должен обеспечивать единый идентификатор случая, распределённый ввод данных по зонам ответственности, стандартизированные поля для гигиенических, клинических и страховых сведений, возможность длительного динамического наблюдения [4–6, 10, 16]. Текущая реализация регионального регистра, к сожалению, не обеспечивает автоматизированной синхронизации с внешними ведомственными источниками и не решает задачи динамического наблюдения. Подобные ограничения описаны и в других регистрах: отсутствие единых форматов и обязательной маршрутизации данных между клиническими, страховыми и надзорными структурами приводило к снижению полноты наблюдения и ухудшению качества аналитики.

Межведомственный регистр должен рассматриваться не как дополнительный статистический ресурс, а как инструмент организационной интеграции всех участников процесса от установления предварительного диагноза ПЗ до составления ПРП и назначения страховых выплат в связи с данной патологией.

Модель межведомственного регистра должна предусматривать разграничение зон ответственности:

- Центр профпатологии (ядро системы) — паспортная часть пациента, профессия, наименование предприятия (организации), результаты обследования, клинический диагноз;
- Роспотребнадзор — профессиональный маршрут, данные по условиям труда;
- Социальный фонд — сведения о назначении страхового обеспечения;

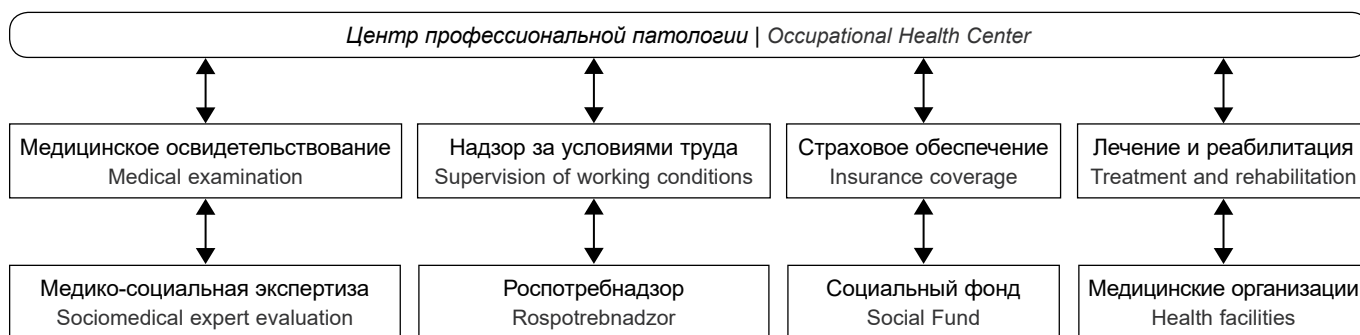


Схема межведомственного взаимодействия центра профпатологии при ведении регистра лиц с профессиональными заболеваниями.

Workflow for interagency cooperation involving the Occupational Pathology Center in maintaining the registry of individuals with occupational diseases.

- МСЭ – данные о степени УПТ, группе инвалидности, ПРП;
- МО (Министерство здравоохранения) – результаты диспансерного наблюдения, обследований, лечения ПЗ и сопутствующей патологии, исходов болезней (см. **рисунк**).

Центральный узел (центр профпатологии) координирует информационный обмен с Роспотребнадзором, МО, Социальным фондом и МСЭ.

Предложенная модель соответствует современным представлениям о роли регистров в доказательной медицине, контроле качества и безопасности медицинской деятельности [4]. Имеющийся российский опыт подтверждает реализуемость подобных решений. В Красноярском крае разработана модель межведомственного регистра лиц с ПЗ, ориентированная на интеграцию данных профпатологической службы, органов надзора и страховых структур [13]. Кроме того, федеральный пилотный проект по организации межведомственного взаимодействия в целях предупреждения ПЗ и создания системы мониторинга здоровья работников<sup>9</sup> продемонстрировал возможность нормативного закрепления обмена данными между медицинскими и страховыми организациями. Разработка аналогичного межведомственного регистра в Свердловской

области представляется не только организационно целесообразной, но и методически обоснованной.

Для устойчивого функционирования межведомственного регистра необходимо регламентирующее закрепление его статуса на уровне субъекта Российской Федерации с установлением регламента информационного обмена, определением сроков, форматов и ответственных подразделений каждого ведомства<sup>10</sup>.

## Заключение

Региональный регистр лиц с ПЗ, сформированный на базе ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора, обладает значительным аналитическим потенциалом, однако требует трансформации из локальной накопительной базы в межведомственную информационную систему с разграниченным доступом и стандартизированными процедурами обновления данных.

Разработка и внедрение межведомственного регистра в Свердловской области позволит повысить полноту и достоверность статистического учёта случаев ПЗ, обеспечить непрерывное сопровождение пациента от этапа установления диагноза до оценки исходов и реабилитации, создать основу для принятия управленческих решений, направленных на сохранение трудового потенциала работающего населения [17–19].

<sup>9</sup> Постановление Правительства РФ от 18.03.2021 г. № 401 «О реализации пилотного проекта по организации межведомственного взаимодействия в целях предупреждения профессиональных заболеваний и создания системы мониторинга состояния здоровья работников».

<sup>10</sup> Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 г. № 822 «Об утверждении Правил ведения федерального регистра лиц с отдельными заболеваниями».

## Литература

(п.п. 7–12, 15, 16 см. References)

1. Туков А.Р., Власова И.В., Михайленко А.М., Зиятдинов М.Н. Показатели санитарной статистики как один из факторов учёта профессиональной заболеваемости. *Уральский медицинский журнал*. 2023; 22(5): 42–8. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-5-42-48> <https://elibrary.ru/kjybtj>
2. Туков А.Р. Нарушение медицинской статистики как одна из причин низкой заболеваемости профессиональными болезнями. *Медицина труда и промышленная экология*. 2021; 61(8): 510–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-8-510-514> <https://elibrary.ru/amxqbw>
3. Кубишин Е.С. Проблемы достоверности учёта профессиональной заболеваемости в России и пути их решения. *Социально-трудовые исследования*. 2023; (1): 94–107. <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2023-50-1-94-107> <https://elibrary.ru/rdklwy>
4. Марцевич С.Ю., Лукина Ю.В., Кутишенко Н.П., Толпыгина С.Н., Лукьянов М.М., Драпкина О.М. Краткий обзор методических рекомендаций «Медицинские регистры. Роль в доказательной медицине. Рекомендации по созданию». *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2023; 22(6): 95–9. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3615> <https://elibrary.ru/rpdydf>
5. Зиятдинов М.Н., Туков А.Р., Михайленко А.М., Арчегова М.Г. Цифровые технологии в учёте и анализе профессиональных заболеваний. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2025; 70(1): 39–44. <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2025-70-1-39-44> <https://elibrary.ru/ouhixd>
6. Потеряева Е.Л., Шпагина Л.А., Паначева Л.А., Смирнова Е.Л., Новикова И.И., Кармановская С.А. и др. Анализ и перспективы работы профпатологической службы в Сибирском федеральном округе. *Медицина труда и промышленная экология*. 2025; 65(2): 86–94. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-2-86-94> <https://elibrary.ru/drjvjt>
13. Захаринская О.Н., Никитина М.И., Терещенко Ю.А., Баскова Н.В., Михайлов А.О. О создании межведомственного регистра лиц с профессиональными заболеваниями в Красноярском крае. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015; (9): 56–7. <https://elibrary.ru/umgpprv>
14. Безрукова Г.А., Микеров А.Н. Современные аспекты методологии регистров пациентов: регистры профессиональных заболеваний (обзор литературы). *Медицина труда и экология человека*. 2022; (1): 99–118. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2022-10107> <https://elibrary.ru/fczhhs>
17. Измеров Н.Ф., Пиктушанская Т.Е. Показатели смертности больных профессиональными заболеваниями и оценка качества медицинской помощи. *Медицина труда и промышленная экология*. 2016; (9): 18–23. <https://elibrary.ru/wmgsub>
18. Иштерьякова О.А., Бодрова Р.А. Эффективность комплексной реабилитации при профессиональных заболеваниях в Республике Татарстан. *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. 2021; 15(5): 143–7. <https://doi.org/10.24412/2075-4094-2021-5-3-15> <https://elibrary.ru/umuubu>
19. Безрукова Г.А., Поздняков М.В., Новикова Т.А. Использование цифровых технологий в социально-гигиеническом мониторинге состояния здоровья работающих во вредных условиях труда. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(10): 1157–62. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1157-1162> <https://elibrary.ru/xtlrr>

## References

1. Tukov A.R., Vlasova I.V., Mikhaylenko A.M., Ziyatdinov M.N. Health statistics indicators as a factor in accounting for occupational morbidity. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2023; 22(5): 42–8. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-5-42-48> <https://elibrary.ru/kjybtj> (in Russian)
2. Tukov A.R. Violation of medical statistics as one of the reasons for the low incidence of occupational diseases. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2021; 61(8): 510–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-8-510-514> <https://elibrary.ru/amxqbw> (in Russian)
3. Kubishin E.S. Reliability of occupational morbidity accounting in Russia: problems and solutions. *Sotsial'no-trudovye issledovaniya*. 2023; (1): 94–107. <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2023-50-1-94-107> <https://elibrary.ru/rdklwy> (in Russian)
4. Martsevich S.Yu., Lukina Yu.V., Kutishenko N.P., Tolpygina S.N., Lukyanov M.M., Drapkina O.M. Guidelines “Medical registries. Role in evidence-based medicine. Recommendations for creation”: a brief review. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*. 2023; 22(6): 95–9. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3615> <https://elibrary.ru/rpdydf> (in Russian)
5. Ziyatdinov M.N., Tuko A.R., Mikhailenko A.M., Archegova M.G. Digital technologies in recording occupational diseases and their analysis. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2025; 70(1): 39–44. <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2025-70-1-39-44> <https://elibrary.ru/ouhixd> (in Russian)
6. Poteryaeva E.L., Shpagina L.A., Panacheva L.A., Smirnova E.L., Novikova I.I., Karmanovskaya S.A., et al. Analysis and prospects of the occupational pathology service in the Siberian Federal District. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2025; 65(2): 86–94. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-2-86-94> <https://elibrary.ru/drjivt> (in Russian)
7. Spreuwers D., de Boer A.G., Verbeek J.H., van Dijk F.J. Characteristics of national registries for occupational diseases: international development and validation of an audit tool (ODIT). *BMC Health Serv. Res.* 2009; 9: 194. <https://doi.org/10.1186/1472-6963-9-194>
8. Urban P., Cikrt M., Hejlek A., Lukáš E., Pelclová D. The Czech National Registry of Occupational Diseases. Ten years of existence. *Cent. Eur. J. Public Health*. 2000; 8(4): 210–2.
9. Davoodi S., Sadeghnia Haghighi K., Rostam Niakan Kalhori S., Shams Hosseini N., Mohammadzadeh Z., Safdari R. Occupational disease registries: characteristics and experiences. *Acta Inform. Med.* 2017; 25(2): 136–40. <https://doi.org/10.5455/aim.2017.25.136-140> <https://elibrary.ru/yhjvov>
10. Khoe L.C., Fitriana Saldi S.R., Isbayuputra M., Mansyur M., Wiseman V., Asante A. Global reporting and underreporting of occupational diseases: a systematic review. *PLoS One*. 2026; 21(3): e0345318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0345318> <https://elibrary.ru/focvpt>
11. Hoy R.F., Brims F.J. The National Occupational Respiratory Disease Registry (NORDR): it is time to learn from failure. *Med. J. Aust.* 2022; 216(7): 328–30. <https://doi.org/10.5694/mja2.51465> <https://elibrary.ru/wmlmtf>
12. Nowak-Pasternak J., Lipińska-Ojrzanowska A., Świątkowska B. Epidemiology of silicosis reported to the central register of occupational diseases over last 20 years in Poland. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*. 2022; 35(5): 561–70. <https://doi.org/10.13075/ijom.1896.01950> <https://elibrary.ru/nyicdc>
13. Zakharskaya O.N., Nikitina M.I., Tereshchenko Yu.A., Baskova N.V., Mikhaylov A.O. About development of interagency register of people with occupational diseases in Krasnoyarsk territory. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2015; (9): 56–7. <https://elibrary.ru/umgppv> (in Russian)
14. Bezrukova G.A., Mikerov A.N. Current aspects of patient register methodology: registers of occupational diseases (review). *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2022; (1): 99–118. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2022-10107> <https://elibrary.ru/fczhhs> (in Russian)
15. Halkier-Sørensen L. Occupational skin diseases: reliability and utility of the data in the various registers; the course from notification to compensation and the costs. A case study from Denmark. *Contact Dermatitis*. 1998; 39(2): 71–8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1998.tb05836.x>
16. Oksa P., Sauni R., Talola N., Virtanen S., Nevalainen J., Saalo A., et al. Trends in occupational diseases in Finland, 1975–2013: a register study. *BMJ Open*. 2019; 9(4): e024040. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-024040>
17. Izmerov N.F., Piktushanskaya T.E. Mortality parameters of patients with occupational diseases and evaluation of medical care quality. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2016; (9): 18–23. <https://elibrary.ru/wmgsub> (in Russian)
18. Ishteryakova O.A., Bodrova R.A. The effectiveness of complex rehabilitation in occupational diseases in the Republic of Tatarstan. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. Elektronnoe izdanie*. 2021; 15(5): 143–7. <https://doi.org/10.24412/2075-4094-2021-5-3-15> <https://elibrary.ru/umuubu> (in Russian)
19. Bezrukova G.A., Pozdnyakov M.V., Novikova T.A. The use of digital technologies in social and hygienic monitoring of the health status of workers in harmful working conditions. *Gigiena i Sanitariya*. 2021; 100(10): 1157–62. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1157-1162> <https://elibrary.ru/xtlrr> (in Russian)

## Сведения об авторах

**Газимова Венера Габдрахмановна**, доктор мед. наук, вед. науч. сотр., зав. отд. организации медицины труда ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [venera@ymrc.ru](mailto:venera@ymrc.ru)

**Соконова Татьяна Владимировна**, врач по гигиене труда отд. организации медицины труда ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [sozonova@ymrc.ru](mailto:sozonova@ymrc.ru)

**Гурвич Владимир Борисович**, науч. руководитель ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [gurvich@ymrc.ru](mailto:gurvich@ymrc.ru)

**Альшиц Елена Анатольевна**, управляющая отделением по Свердловской области Социального фонда России. E-mail: [ealshic@mail.ru](mailto:ealshic@mail.ru)

**Шастин Александр Сергеевич**, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отд. организации медицины труда ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [shastin@ymrc.ru](mailto:shastin@ymrc.ru)

**Кузьмин Дмитрий Вячеславович**, науч. сотр. лаб. социально-гигиенического мониторинга ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [dmitryk@ymrc.ru](mailto:dmitryk@ymrc.ru)

**Иващенко Максим Андреевич**, зав. информационно-аналитическим отд., науч. сотр. ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: [ivachenko@ymrc.ru](mailto:ivachenko@ymrc.ru)

## About the authors

**Venera G. Gazimova**, DSc (Medicine), leading researcher, head, Department of Occupational Medicine Organization, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3591-3726> E-mail: [venera@ymrc.ru](mailto:venera@ymrc.ru)

**Tatyana V. Sozonova**, occupational hygienist, Department of Occupational Medicine Organization, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-2124-4876> E-mail: [sozonova@ymrc.ru](mailto:sozonova@ymrc.ru)

**Vladimir B. Gurvich**, DSc (Medicine), scientific director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6475-7753> E-mail: [gurvich@ymrc.ru](mailto:gurvich@ymrc.ru)

**Elena A. Alshits**, head, Sverdlovsk Region Branch, Social Fund of Russia, Yekaterinburg, 620000, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-2461-6247> E-mail: [ealshic@mail.ru](mailto:ealshic@mail.ru)

**Aleksandr S. Shastin**, PhD (Medicine), leading researcher, Department of Occupational Medicine Organization, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8363-5498> E-mail: [shastin@ymrc.ru](mailto:shastin@ymrc.ru)

**Dmitry V. Kuzmin**, researcher, Laboratory of public health monitoring, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3613-8330> E-mail: [dmitryk@ymrc.ru](mailto:dmitryk@ymrc.ru)

**Maxim A. Ivashchenko**, head, Information analysis department, researcher, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1253-3202> E-mail: [ivachenko@ymrc.ru](mailto:ivachenko@ymrc.ru)



Наумова О.В., Бодиенкова Г.М., Боклаженко Е.В.

## Ассоциации полиморфных генов – медиаторов воспаления IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) с уровнем цитокинов у пациентов с вибрационной болезнью

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Изучение полиморфизма генов, ответственных за иммунный ответ и воспаление, имеет высокую важность для современной биомедицинской науки. Цитокины являются ключевыми медиаторами и участниками воспалительного процесса. Сывороточные уровни IL-6 и TNF-α могут быть обусловлены функциональным полиморфизмом соответствующих генов и оказывать неблагоприятное влияние на течение вибрационной болезни (ВБ), утяжеляя её клинические проявления.

**Цель исследования** – оценить ассоциацию полиморфных генов IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) с концентрациями цитокинов (IL-6, TNF-α, IL-4) у пациентов с ВБ.

**Материалы и методы.** Генотипирование полиморфных локусов rs1800795 гена IL-6 и rs1800629 гена TNF осуществляли методом полимеразной цепной реакции. Сывороточные концентрации цитокинов (IL-4, IL-6, TNF-α) определяли методом твердофазного иммуноферментного анализа.

**Результаты.** Установлено, что частота носительства гетерозиготного C/G генотипа гена IL-6 (rs1800795) была статистически значимо выше у пациентов с ВБ в отличие от лиц группы сравнения. Значимых ассоциативных зависимостей полиморфных вариантов генов IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) с концентрациями IL-6, TNF-α у пациентов с ВБ выявлено не было. Вместе с тем полученные результаты свидетельствуют о развитии дисбаланса в системе цитокинов и компенсаторных механизмах цитокиновой регуляции нейроиммунного ответа при всех генотипах генов IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) у пациентов с ВБ.

**Ограничения исследования.** Ограничение данной работы – малочисленные группы работающих.

**Заключение.** Получены новые данные о частоте генотипов и аллелей полиморфных генов IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) у пациентов с ВБ. Выявлено, что наличие генотипа C/G гена IL-6 (rs1800795) у пациентов с ВБ может быть связано с изменением уровня IL-6 и увеличением риска развития и усиления воспалительной реакции при формировании профессиональной патологии. Результаты могут быть обусловлены как генетическими факторами, так и эпигенетическими изменениями, что отражает развитие дисбаланса в системе цитокинов и нарушения нейроиммунного взаимодействия у пациентов с ВБ.

**Ключевые слова:** вибрационная болезнь; провоспалительные и противовоспалительные цитокины; интерлейкин-4; интерлейкин 6; фактор некроза опухоли альфа; полиморфизм генов; ген IL-6; ген TNF; генетическая предрасположенность

**Соблюдение этических стандартов.** В процессе исследования были соблюдены этические стандарты Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (2024 г.). Заключение Локального этического комитета ФГБНУ ВСИМЭИ (протокол № 5 от 21.03.2023 г.). Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Наумова О.В., Бодиенкова Г.М., Боклаженко Е.В. Ассоциации полиморфных генов – медиаторов воспаления IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) с уровнем цитокинов у пациентов с вибрационной болезнью. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 992–998. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-992-998> <https://elibrary.ru/zmhajj>

**Для корреспонденции:** Наумова Ольга Вячеславовна, e-mail: [immun11@yandex.ru](mailto:immun11@yandex.ru)

**Вклад авторов:** Наумова О.В. – дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Бодиенкова Г.М. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Боклаженко Е.В. – сбор и обработка материала. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках средств, выделенных для реализации государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Поступила: 01.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Olga V. Naumova, Galina M. Bodienkova, Elena V. Boklazhenko

## Associations of polymorphic genes encoding the inflammatory mediators IL-6 (rs1800795) and TNF (rs1800629) with cytokine levels in patients with vibration disease

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The study of the polymorphism of the genes responsible for the immune response and inflammation is of considerable interest in modern biomedical science. Cytokines are key mediators and participants in the inflammatory process. Serum IL-6 and TNF-α levels may be caused by the functional polymorphism of the corresponding genes and have an adverse effect on the course of vibration disease (VD), aggravating its clinical manifestations.

**Aim of the study.** To evaluate the association of polymorphic \*IL-6\* (rs1800795) and \*TNF\* (rs1800629) genes with cytokine concentrations (IL-6, TNF-α, IL-4) in VD patients.

**Material and Methods.** Genotyping of the polymorphic loci rs1800795 of the IL-6 gene and rs1800629 of the TNF gene was performed by polymerase chain reaction. Serum cytokine concentrations (IL-4, IL-6, TNF-α) were determined by enzyme-linked immune sorbent assay.

**Results.** The frequency the heterozygous C/G genotype of the IL-6 gene (rs1800795) was found to be statistically significantly higher in VD patients, in contrast to individuals in the comparison group. There were no significant association relationships between polymorphic variants of the IL-6 (rs1800795) and TNF (rs1800629) genes with concentrations of IL-6, TNF-α in VD patients. At the same time, the results obtained indicate to the development of an imbalance in the

*cytokine system and compensatory mechanisms of cytokine regulation of the neuroimmune response in all genotypes of the IL-6 (rs1800795) and TNF (rs1800629) genes in VD patients.*

**Limitations.** The limitations of this work are small groups of patients.

**Conclusion.** New data on the frequency of genotypes and alleles of polymorphic genes IL-6 (rs1800795) and TNF (rs1800629) in VD patients have been obtained. It was revealed that the presence of the C/G genotype of the IL-6 gene (rs1800795) in VD patients might be associated with a change in the level of IL-6 and an increase in the risk of developing and intensifying an inflammatory response during the formation of occupational disease. The results obtained may be due to both genetic factors and epigenetic changes, which reflects the development of an imbalance in the cytokine system and impaired neuroimmune interaction in VD patients.

**Keywords:** vibration disease; proinflammatory and anti-inflammatory cytokines; interleukin-4; interleukin 6; tumor necrosis factor alpha; gene polymorphism; IL-6 gene; TNF gene; genetic predisposition

**Compliance with ethical standards.** During the study were observed the ethical standards of the Helsinki Declaration of the World Medical Association "Ethical Principles for Conducting Scientific Medical Research with Human Participation" (2024). There is a conclusion of the Local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution VSIMEI (protocol No. 5 dated 03/21.2023). All participants gave informed voluntary written consent to participate in the study.

**For citation:** Naumova O.V., Bodienkova G.M., Boklazhenko E.V. Associations of polymorphic genes encoding the inflammatory mediators IL-6 (rs1800795) and TNF (rs1800629) with cytokine levels in patients with vibration disease. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 992–998. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-992-998> <https://elibrary.ru/zmhajn> (In Russ.)

**For correspondence:** Olga V. Naumova, e-mail: [immun11@yandex.ru](mailto:immun11@yandex.ru)

**Contribution:** Naumova O.V. – collection and processing of material, design of research, writing of text, editing; Bodienkova G.M. – concept and design of research, writing of text, editing; Boklazhenko E.V. – collection and processing of material, statistical processing; All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The work was performed within the framework of funds allocated for the implementation of the state task East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Received: June 1, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Профессиональная деятельность работников горнодобывающей, авиа- и машиностроительной, транспортной и некоторых других отраслей промышленности связана с воздействием вибрации, шума и высоких психо-психических нагрузок. Вибрация является сильным стрессирующим фактором и приводит к формированию вибрационной болезни (ВБ) [1]. В результате многолетних исследований установлено, что последствия влияния данных факторов способствуют возникновению функциональных нарушений иммунной и центральной нервной систем (ЦНС) у пациентов с ВБ [2, 3]. ЦНС представляет собой динамичную структуру, осуществляющую активное нейроиммунное взаимодействие в физиологических и патологических состояниях организма. В исследованиях влияния стрессовых факторов подчёркивается важная роль цитокиновой системы и нарушения баланса в ней [4]. Цитокины выступают основными медиаторами и участниками воспалительного ответа, что обуславливает их ведущую роль в патогенезе многих болезней [5]. При стрессе в тканях головного мозга повышается образование провоспалительных цитокинов и фактора некроза опухоли  $\alpha$  (TNF- $\alpha$ ), которые на молекулярном уровне участвуют в сложных когнитивных процессах, таких как синаптическая пластичность, нейрогенез, нейромодуляция. В ответ на стресс активируются и противовоспалительные цитокины (IL-4, IL-10 и др.) [6].

Сывороточная продукция цитокинов, вовлечённых в патогенез стресса, может быть опосредована функциональным полиморфизмом их генов. Установлено, что гены TNF- $\alpha$  и интерлейкинов 1, 6, 8, 10 (IL-1, IL-6, IL-8, IL-10) имеют отношение как к иммунной активации, так и к депрессии [7, 8]. В промоторной области гена IL-6 в положении –174 находится полиморфизм rs1800795. Этот полиморфный вариант оказывает влияние на транскрипцию и секрецию IL-6, и данные изменения рассматриваются как важные факторы риска развития болезней у человека [9]. Полиморфизм rs1800795 выступает полезным прогностическим маркёром при таких патологиях, как ишемическая болезнь сердца, воспалительные процессы, ишемический инсульт, ревматоидный артрит и хроническая воспалительная демиелинизирующая полинейропатия [10, 11].

Наряду с геном IL-6 представляет интерес полиморфный вариант гена TNF, продукт которого стимулирует синтез IL-1, IL-6. Наиболее важной мутацией является замена гуанина на аденин в позиции 308 (rs1800629), которая влияет на уро-

вень белка TNF- $\alpha$  [12]. В исследованиях полиморфизма гена TNF были установлены ассоциации с сердечно-сосудистыми, эндокринными патологиями [13, 14], развитием депрессивных расстройств [15].

В ранее выполненных исследованиях у лиц с ВБ была установлена гиперпродукция провоспалительных цитокинов IL-1 $\beta$ , IL-6 и IL-8 [16]. Можно предположить, что сывороточная продукция цитокинов IL-6, TNF- $\alpha$ , отражающая нарушения нейроиммунного взаимодействия, опосредована функциональным полиморфизмом генов и может оказывать негативное влияние на течение вибрационной болезни, утяжеляя клиническую картину. Поэтому целью исследования была оценка ассоциации полиморфных генов IL-6 (rs1800795) и TNF (rs1800629) с концентрациями цитокинов (IL-6, TNF- $\alpha$ , IL-4) у пациентов с вибрационной болезнью.

## Материалы и методы

Методом анкетирования осуществляли сбор данных об этнической принадлежности пациентов. Все вошедшие в исследование лица – русские, проживающие на территории Иркутской области. На проведение исследования было получено разрешение локального этического комитета. После подписания информированного согласия в клинических условиях были обследованы 149 пациентов мужского пола с ВБ, возраст 50,5 (44–56) года, стаж работы в условиях воздействия вибрации – 22 (18,5–31) года (группа 1). Критерием включения было наличие установленного во время работы в контакте с вредным производственным фактором диагноза ВБ, отсутствие экспозиции вибрацией на момент исследования, черепно-мозговых травм в анамнезе, коморбидной патологии, которая могла бы повлиять на обмен цитокинов (ожирение, сахарный диабет, артериальная гипертензия). Все обследования выполнены при поступлении в клинику до лечения.

Группа сравнения (группа 2), сопоставимая по возрасту [55 (45–60) лет;  $p = 0,07$ ], была представлена 40 здоровыми мужчинами, которые по специфике профессиональной деятельности не подвергались воздействию вибрации, не предъявляли жалоб на ухудшение памяти и внимания, не имели черепно-мозговых травм в анамнезе, а на момент исследования – острых и хронических (в стадии обострения) болезней.

Забор венозной крови проводили в вакутейнеры с КЗЭДТА (Improve, Китай), центрифугировали их при 3000 об./мин в течение 15 мин. Лейкоцитарную фракцию цельной кро-

Таблица 1 / Table 1

Распределение частот генотипов и аллелей полиморфных вариантов генов *IL-6* (*rs1800795*) и *TNF* (*rs1800629*) в исследованных группах

Distribution of genotype and allele frequencies of polymorphic variants of *IL-6* (*rs1800795*) and *TNF* (*rs1800629*) genes in the studied groups

| Ген полиморфный локус<br>Gene polymorphic locus | Генотипы и аллели<br>Genotypes and alleles | Пациенты с ВБ<br>Patients with VD<br><i>n</i> = 149 | Группа сравнения<br>Comparison group<br><i>n</i> = 40 | <i>p</i> | OR (95% CI)         |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|---------------------|
| <i>IL-6 rs1800795</i><br><i>C174G</i>           | <i>G/G</i>                                 | 55 (36.9)                                           | 17 (42.5)                                             | 0.644    | 0.792 (0.389–1.610) |
|                                                 | <i>C/G</i>                                 | 81 (54.4)                                           | 14 (35.0)                                             | 0.046    | 2.212 (1.071–4.569) |
|                                                 | <i>C/C</i>                                 | 13 (8.7)                                            | 9 (22.5)                                              | 0.033    | 0.329 (0.129–0.839) |
|                                                 | <i>G</i>                                   | 191 (64.0)                                          | 48 (60.0)                                             | 0.587    | 1.190 (0.717–1.974) |
|                                                 | <i>C</i>                                   | 107 (36.0)                                          | 32 (40.0)                                             |          | 0.840 (0.507–1.394) |
| <i>TNF rs1800629</i><br><i>G308A</i>            | <i>G/G</i>                                 | 122 (81.9)                                          | 29 (72.5)                                             | 0.275    | 1.714 (0.763–3.851) |
|                                                 | <i>G/A</i>                                 | 27 (18.1)                                           | 11 (27.5)                                             | 0.275    | 0.583 (0.260–1.311) |
|                                                 | <i>A/A</i>                                 | —                                                   | —                                                     | —        | —                   |
|                                                 | <i>G</i>                                   | 271 (91)                                            | 69 (86)                                               | 0.304    | 1.600 (0.756–3.385) |
|                                                 | <i>A</i>                                   | 27 (9)                                              | 11 (14)                                               | 0.304    | 0.625 (0.295–1.322) |

Примечание. Приведены абсолютные значения (частота, %); значение *p* для критерия  $\chi^2$  с поправкой Йетса; значения отношения шансов (OR), 95%-й доверительный интервал (95% CI).

Note: There are presented the absolute values (frequency, %); Yates-corrected  $\chi^2$  test p-value; odds ratio (OR) values, 95% confidence interval (95% CI).

ви аликвотировали и хранили в низкотемпературном холодильнике при температуре минус 70 °C (Sanyo, Япония). На следующем этапе выделяли ДНК с помощью наборов «ДНК-Экстрен-1» («Синтол», Россия, кат. ном. Ex-509-100). Генотипирование выполняли с использованием коммерческих тест-систем для полиморфизмов *G308A* гена *TNF* (*rs1800629*), *C174G* гена *IL-6* (*rs1800795*) фирмы «Синтол» (Россия, кат. ном. NP-465-100, NP-512-100) в режиме реального времени на приборе CFX-96 (BioRad, США) в соответствии с инструкцией от производителя.

Для определения концентраций *IL-4*, *IL-6*, *TNF-α* у пациентов брали однократно натощак венозную кровь при поступлении в стационар, используя вакутейнеры с активатором свёртывания (Improve, Китай). Затем проводили центрифугирование при 1500 об./мин в течение 15 мин для получения сыворотки. Сыворотку отбирали в отдельные пробирки Эппендорф (Eppendorf). Методом иммуноферментного анализа определяли содержание *IL-4*, *IL-6*, *TNF-α* с использованием наборов производства ЗАО «Вектор-Бест» (Новосибирск).

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета прикладных программ Statistica 10.0. Наблюдаемую частоту генотипов проверяли на соответствие равновесию Харди – Вайнберга с применением онлайн-калькулятора (<https://calcgeek.com/equilibriumhardy-weinberg/>). Для оценки различий между группами по частотам аллелей и генотипов рассчитывали критерий (хи-квадрат с поправкой Йетса ( $\chi^2$ )) и отношение шансов в онлайн-калькуляторах (<https://medstatistic.ru/calculators/calchi.html>, <https://medstatistic.ru/calculators/calcodds.html> соответственно). В случае отсутствия правильного распределения для оценки значимости различий между абсолютными количественными показателями использовали непараметрический метод – *U*-критерий Манна – Уитни. Различия считали статистически достоверными при уровне значимости  $p < 0,05$ , для трёх групп –  $p \leq 0,017$ . Результаты исследований представлены в виде значения медианы (*Me*), интерквартильного размаха значений  $Q_1$ – $Q_3$ .

Исследования выполнены с информированного согласия пациентов и одобрены Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение № 5 от 21.03.2023 г.).

## Результаты

Распределение частот генотипов полиморфизма *rs1800629* гена *TNF* у пациентов с ВБ и в группе сравнения соответствовало равновесию Харди – Вайнберга ( $\chi^2 = 1,48$ ;  $p = 0,224$  и  $\chi^2 = 1,02$ ;  $p = 0,313$  соответственно). В отличие от наблюдаемого распределения частот генотипов полиморфизма *rs1800795* гена *IL-6* у пациентов с ВБ, которое не соответствовало равновесию Харди – Вайнберга ( $\chi^2 = 4,89$ ;  $p = 0,027$ ), в группе сравнения соблюдалось данное равновесие:  $\chi^2 = 2,93$ ;  $p = 0,087$ . Отклонение от равновесия Харди – Вайнберга в группе пациентов с ВБ может быть связано с небольшим размером выборки, однако в некоторых генетических исследованиях на аналогичных выборках пациентов с ВБ были получены результаты [17]. Не исключено, что это может быть связано с когортой обследуемых и влиянием таких этиологических факторов развития данной профпатологии, как воздействие вибрации и высоких нервно-психических нагрузок. Важно учитывать, что равновесие Харди – Вайнберга – это вероятностная модель, которая в реальных популяциях редко полностью соблюдается, поскольку их численность ограничена, генофонд имеет мутационную изменчивость, нет абсолютной изоляции от притока мигрантов, действуют дрейф генов и естественный отбор [18]. Для более ясного понимания необходимы дальнейшие исследования на более обширной выборке пациентов.

Результаты молекулярно-генетических исследований представлены в табл. 1. Наиболее значимые различия выявлены по частоте носительства гетерозиготного *C/G* генотипа гена *IL-6* (*rs1800795*) у пациентов с ВБ. Это проявлялось в повышенной частоте носительства генотипа *C/G* у пациентов с профпатологией ( $p = 0,046$ ) в отличие от лиц группы сравнения (54,4 и 35% соответственно). Статистический анализ отношения шансов показал, что у пациентов с ВБ и этим генотипом вероятность риска развития и усиления воспалительной реакции достоверно выше ( $OR = 2,212$ ; 95%  $CI = 1,071$ – $4,569$ ) по сравнению с пациентами с гомозиготными генотипами *G/G* и *C/C*. Также установлена повышенная частота встречаемости редкого генотипа *C/C* в группе сравнения относительно пациентов с ВБ – 22,5 и 8,7% соответственно ( $p = 0,033$ ). При этом генотипе значение отно-

Таблица 2 / Table 2

Средние значения сыровоточного уровня IL-6, IL-4 и TNF-α у пациентов с ВБ и в группе сравнения, *Me* ( $Q_1$ – $Q_3$ ) в зависимости от генотипов гена *IL-6* (*rs1800795*) *C174G*

Mean serum levels of IL-6, IL-4, and TNF-α in patients with VD and the comparison group, *Me* ( $Q_1$ – $Q_3$ ) by *IL-6* genotype (*rs1800795*) *C174G*

| Показатель<br>Indicator | Генотип<br>Genotype | Пациенты с ВБ<br>Patients with VD<br><i>n</i> = 149 | Группа сравнения<br>Comparison group<br><i>n</i> = 40 | <i>p</i> |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
| IL-6,<br>пг/мл   pg/mL  | <i>G/G</i>          | 3.040 (1.836–4.430)                                 | 2.190 (1.644–3.405)                                   | 0.173    |
|                         | <i>C/G</i>          | 2.883 (1.539–4.389)                                 | 1.266 (0.714–3.398)                                   | 0.129    |
|                         | <i>C/C</i>          | 2.904 (1.843–3.578)                                 | 3.078 (2.146–3.905)                                   | 0.759    |
| IL-4,<br>пг/мл   pg/mL  | <i>G/G</i>          | 2.591* (1.066–3.933)                                | 3.055 (3.028–4.042)                                   | 0.179    |
|                         | <i>C/G</i>          | 2.779* (1.173–3.815)                                | 2.798 (2.710–3.055)                                   | 0.614    |
|                         | <i>C/C</i>          | 4.776 (3.822–5.881)                                 | 2.798 (2.710–4.286)                                   | 0.056    |
| TNF-α,<br>пг/мл   pg/mL | <i>G/G</i>          | 1.510 (0.415–3.675)                                 | 2.689 (2.370–3.394)                                   | 0.028    |
|                         | <i>C/G</i>          | 1.112 (0.341–2.893)                                 | 2.801 (0.600–3.410)                                   | 0.422    |
|                         | <i>C/C</i>          | 2.381 (0.336–3.184)                                 | 2.799 (2.304–3.248)                                   | 0.357    |

Примечание. Различия между группами статистически значимы при  $p < 0.05$ ; \* – различия статистически значимы по сравнению с генотипом *C/C* у лиц с ВБ,  $p \leq 0.017$ .

Note: differences between groups are statistically significant at  $p < 0.05$ ; \* – differences are statistically significant compared to *C/C* genotype in individuals with WB,  $p \leq 0.017$ .

шения шансов и доверительного интервала было меньше 1, что говорит о вероятности снижения риска развития и усиления воспалительной реакции у данных лиц.

Исследование полиморфного локуса гена *TNF* (*rs1800629*) в сравниваемых группах не выявило различий в распределении его аллелей и генотипов. Необходимо отметить, что проведённое исследование не определило носителей редкой *A/A* гомозиготы *rs1800629* в обеих группах (см. табл. 1).

Далее мы проанализировали изменения концентрации цитокинов IL-6, IL-4 и TNF-α в зависимости от генотипов гена *IL-6* (*rs1800795*) *C174G*. При разделении лиц обеих групп на подгруппы в зависимости от генотипов полиморфного варианта гена *IL-6* (*rs1800795*) *C174G* и сопоставлении сыровоточных концентраций IL-6 между ними не были установлены статистически значимые различия. При всех генотипах средний уровень IL-6 у пациентов с ВБ находился в пределах одних числовых значений (табл. 2). При наличии редкого генотипа *C/C* гена *IL-6* (*rs1800795*) была выявлена тенденция к повышению уровня IL-4 в группе пациентов

с ВБ (4,776 (3,822–5,881) пг/мл) при сопоставлении с группой сравнения (2,798 (2,71–4,286) пг/мл),  $p = 0,056$ . Стоит отметить, что уровень IL-4 у пациентов с ВБ при генотипах *G/G* и *C/G* был статистически значимо ниже ( $p = 0,011$  и  $p = 0,017$ ), чем при генотипе *C/C*. Анализ концентрации TNF-α показал, что его уровень при генотипе *G/G* гена *IL-6* (*rs1800795*) был понижен в группе пациентов с ВБ – 1,51 (0,415–3,675) пг/мл, в отличие от такового в группе сравнения – 2,689 (2,37–3,394) пг/мл ( $p = 0,028$ ).

Средние значения сыровоточного уровня TNF-α и IL-4, IL-6 у пациентов с ВБ и в группе сравнения в зависимости от генотипов гена *TNF* (*rs1800629*) *G308A* представлены в табл. 3. Следует отметить, что статистически значимые различия в сравниваемых группах выявлены только в содержании TNF-α. Уровень данного анализатора при наличии генотипов *G/G* и *G/A* гена *TNF* (*rs1800629*) был понижен в группе пациентов с ВБ при сопоставлении с группой сравнения ( $p = 0,043$  и  $p = 0,013$  соответственно); был равен у пациентов с ВБ 1,544 (0,341–3,184) и 0,659 (0,336–2,253) пг/мл и лиц группы сравнения – 2,847 (2,3–3,394) и 2,745 (2,361–3,237) пг/мл

Таблица 3 / Table 3

Средние значения сыровоточного уровня TNF-α и IL-4, IL-6 у пациентов с ВБ и в группе сравнения, *Me* ( $Q_1$ – $Q_3$ ) в зависимости от генотипов гена *TNF* (*rs1800629*) *G308A*

Mean values of serum TNF-α and IL-4, IL-6 levels in patients with VD and comparison group, *Me* ( $Q_1$ – $Q_3$ ) depending on *TNF* gene genotypes (*rs1800629*) *G308A*

| Показатель<br>Indicator | Генотип<br>Genotype | Пациенты с ВБ<br>Patients with VD<br><i>n</i> = 149 | Группа сравнения<br>Comparison group<br><i>n</i> = 40 | <i>p</i> |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------|
| TNF-α,<br>пг/мл   pg/mL | <i>G/G</i>          | 1.544 (0.341–3.184)                                 | 2.847 (2.304–3.394)                                   | 0.043    |
|                         | <i>G/A</i>          | 0.659 (0.336–2.253)                                 | 2.745 (2.361–3.237)                                   | 0.013    |
| IL-4,<br>пг/мл   pg/mL  | <i>G/G</i>          | 2.818 (1.309–4.478)                                 | 3.055 (2.798–3.256)                                   | 0.309    |
|                         | <i>G/A</i>          | 2.735 (1.037–3.883)                                 | 2.841 (2.754–4.164)                                   | 0.413    |
| IL-6,<br>пг/мл   pg/mL  | <i>G/G</i>          | 2.883 (1.564–4.244)                                 | 2.183 (1.460–3.405)                                   | 0.187    |
|                         | <i>G/A</i>          | 3.401* (2.070–6.502)                                | 2.447 (1.383–3.905)                                   | 0.273    |

Примечание. Различия между группами статистически значимы при  $p < 0.05$ ; \* – различия статистически значимы между генотипами у лиц с ВБ,  $p \leq 0,05$ .

Note: differences between groups are statistically significant at  $p < 0.05$ ; \* – differences are statistically significant between genotypes in individuals with VD,  $p \leq 0.05$ .

соответственно. Также в группе с ВБ было отмечено статистически значимое повышение уровня IL-6 у лиц с генотипом *G/A* по сравнению с лицами с генотипом *G/G* ( $p = 0,048$ ).

## Обсуждение

В настоящее время известно, что механизмы развития воспалительных процессов могут быть ассоциированы с генетическим полиморфизмом цитокинов, хемокинов и их рецепторов. Однако опубликованные данные, касающиеся различных патологий и популяционных групп, зачастую противоречивы. Как известно, гиперпродукция провоспалительных цитокинов и процессы воспаления характерны и для развития ВБ.

По результатам проведённого нами исследования частота носительства гетерозиготного *C/G* генотипа гена *IL-6* (*rs1800795*) была статистически значимо выше у пациентов с ВБ в отличие от лиц группы сравнения (см. табл. 1). В эксперименте *in vivo* Bennermo M. и соавт. было показано, что аллель *G* гена *IL-6* (*rs1800795*) связан с усилением воспалительной реакции, проявляющейся повышением уровня IL-6 [19]. В одном из исследований было показано, что частота аллели  $-174G$  гена *IL-6* в выборке этнических русских соответствует его частоте в популяциях Европы, где преобладает носительство аллельного варианта  $-174C$  гена *IL-6*, который отвечает за сниженную выработку провоспалительного цитокина [20, 21]. В нашем исследовании с этими данными согласуется повышенная частота встречаемости генотипа *C/C* в группе сравнения относительно пациентов с ВБ (см. табл. 1). Предполагают, что в связи с нарастанием антропогенного загрязнения окружающей среды, провоцирующего воспалительные реакции, риск ассоциированных с воспалением болезней будет увеличиваться в этнических группах с повышенными частотами аллели  $-174G$  гена *IL-6* [20]. Следовательно, установленное статистически значимое носительство полиморфного локуса *C/G* гена *IL-6* (*rs1800795*) у пациентов с ВБ может быть связано с возможным повышением уровня IL-6 и увеличением риска развития и усиления воспалительной реакции на начальных этапах формирования ВБ.

В результате проведённых ранее исследований у пациентов с ВБ было показано статистически значимое повышение уровней провоспалительных цитокинов IL-1 $\beta$ , IL-6 и IL-8 [16]. В этом исследовании при всех генотипах гена *IL-6* (*rs1800795*) между группами пациентов с ВБ и сравнения не было выявлено статистически значимых различий в сывороточном содержании IL-6 (см. табл. 2). Было установлено, что уровень TNF- $\alpha$  при генотипе *G/G* гена *IL-6* (*rs1800795*) был понижен в группе пациентов с ВБ в отличие от такового в группе сравнения (см. табл. 2). Это, возможно, связано с механизмами взаимодействий данных цитокинов между собой. Известно, что стимулировать синтез IL-6 путём активации внутриклеточного сигнального пути NF- $\kappa$ B может TNF- $\alpha$ , усиливая воспалительный ответ. Поскольку наличие генотипа *G/G* способствует повышению уровня IL-6, а нами было выявлено снижение концентрации TNF- $\alpha$  у пациентов с ВБ, можно предположить, что в данном случае происходит развитие дисбаланса в системе цитокинов у данных пациентов.

Известно, что синтез TNF- $\alpha$  клетками мозга и Т-лимфоцитами через механизм обратной связи может ограничивать IL-4, тем самым играя протективную роль при воспалительных процессах. IL-4 способен ингибировать продукцию провоспалительных цитокинов как в нормальных мозговых тканях, так и при развитии нейровоспаления [22, 23]. При наличии редкого генотипа *C/C* гена *IL-6* (*rs1800795*), который отвечает за сниженную выработку IL-6, у лиц с ВБ была выявлена тенденция к наличию более высокого уровня IL-4 при сопоставлении с группой сравнения (см. табл. 2). А уровень IL-4 у пациентов с ВБ при генотипах *G/G* и *C/G* гена *IL-6* (*rs1800795*) был статистически значимо ниже, чем при генотипе *C/C* (см. табл. 2). Было показа-

но, что снижение экспрессии IL-4 усугубляло когнитивные нарушения и усиливало воспалительные реакции. В то же время терапия, направленная на повышение уровня IL-4, потенциально ослабляла эти эффекты за счёт повышения экспрессии нейротрофического фактора мозга и синаптофизина, подавления активации микроглии и снижения продукции провоспалительных цитокинов [24].

С воспалением может быть связан полиморфизм гена *TNF* (*rs1800629*) *G308A*, который усиливает транскрипционную активность гена и может влиять на воспалительные процессы. В нашем исследовании полиморфного локуса гена *TNF* (*rs1800629*) в сравниваемых группах не выявлено различий в распределении его аллелей и генотипов. В литературе встречается достаточно много исследований данного полиморфизма, результаты которых достаточно противоречивы. Обнаружена связь *rs1800629* гена *TNF* с повышением уровней TNF- $\alpha$  при ишемическом инсульте у азиатов и европеоидов [25]. Согласно результатам метаанализа L. Hu и соавт., аллель *A* полиморфизма *rs1800629* гена *TNF* обладает протективным эффектом и снижает риск развития аневризмы сосудов головного мозга у европеоидов [26]. Однако в содержании TNF- $\alpha$  нами отмечены статистически значимые различия. Носительство аллели *A* гена *TNF* (*rs1800629*) связано с более высоким уровнем TNF- $\alpha$ , а аллели *G* – с уменьшением его продукции [12]. У пациентов с ВБ и генотипом *G/G* наблюдалась такая тенденция. Стоит отметить, что и у лиц с ВБ и генотипом *G/A* уровень данного цитокина был снижен относительно группы сравнения (см. табл. 3). При этом в группе с ВБ было отмечено статистически значимое повышение уровня IL-6 у лиц с генотипом *G/A* по сравнению с лицами с генотипом *G/G* (см. табл. 3). Можно предположить, что снижение синтеза TNF- $\alpha$ , установленные ранее у данных пациентов изменения в соотношении провоспалительных и противовоспалительных медиаторов [2, 16] и длительное воздействие профессиональных стрессирующих факторов приводят к хронической активации иммунной системы и истощению её клеток (макрофагов, моноцитов), которые являются основными продуцентами TNF- $\alpha$ . Следовательно, данные механизмы цитокиновой регуляции нейроиммунного ответа могут способствовать снижению уровня TNF- $\alpha$  и развитию дисбаланса в системе цитокинов у пациентов с ВБ.

Известно, что функционирование цитокинов представляет собой сложенный механизм, в котором постоянно происходит кооперация. В связи с этим влияние на одно из звеньев цитокиновой системы вызывает сдвиги в функционировании всего комплекса и приводит к развитию различных патологических состояний [27]. Поскольку краткосрочный стресс сопровождается усилением иммунных реакций и, следовательно, увеличением числа циркулирующих цитотоксических Т-лимфоцитов, а долгосрочный хронический стресс снижает их эффективность [28], можно предположить, что полученные результаты свидетельствуют о компенсаторных механизмах цитокиновой регуляции нейроиммунного ответа у пациентов с ВБ.

Таким образом, у пациентов с ВБ при всех генотипах генов *IL-6* (*rs1800795*) и *TNF* (*rs1800629*) происходит развитие дисбаланса в системе цитокинов. Данные механизмы цитокиновой регуляции нейроиммунного ответа могут способствовать изменению продукции и активности нейромедиаторов у этих пациентов [16, 29], что может привести к нарушению функций нейронов головного мозга [30].

## Заключение

В результате проведённых исследований получены новые данные о частоте генотипов и аллелей полиморфных генов *IL-6* (*rs1800795*) и *TNF* (*rs1800629*) у пациентов с вибрационной болезнью и в группе сравнения. Значимых ассоциативных зависимостей полиморфных вариантов генов

*IL-6 (rs1800795)* и *TNF (rs1800629)* с концентрациями *IL-6* и *TNF-α* у пациентов с вибрационной болезнью выявлено не было. Вместе с тем полученные результаты показали, во-первых, повышенную частоту носительства *C/G* генотипа у пациентов с ВБ в отличие от лиц группы сравнения и, во-вторых, наличие повышенной относительно пациентов с ВБ частоты встречаемости генотипа *C/C* в группе сравнения. Генотип *C/G* гена *IL-6 (rs1800795)* у пациентов с ВБ может свидетельствовать о возможном его влиянии на уровень *IL-6* и риске развития и усилении воспалительной реакции при формировании ВБ у данных пациентов, в том числе о негативном влиянии на развитие и течение данной патологии, утяжелении её клинической картины.

## Литература

(п.п. 6–12, 14, 19, 21–26, 30 см. References)

1. Азовская Т.А., Вакурова Н.В., Лаврентьева Н.Е. О современных аспектах диагностики и классификации вибрационной болезни. *Русский медицинский журнал*. 2014; 22(16): 1206–1209. <https://elibrary.ru/skboqf>
2. Бодиевкова Г.М., Боклаженко Е.В. Изменение уровня нейрональных белков и антител к ним при профессиональных заболеваниях нервной системы. *Биомедицинская химия*. 2024; 70(2): 109–113. <https://doi.org/10.18097/PBMC20247002109> <https://elibrary.ru/kzpzaf>
3. Шевченко О.И., Лахман О.Л., Русанова Д.В. Оценка нейрофункциональной активности у пациентов с вибрационной болезнью, обусловленной воздействием локальной вибрации. *Медицина труда и промышленная экология*. 2023; 63(11): 709–714. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-709-714> <https://elibrary.ru/brfvsc>
4. Прохоренко И.О., Германова В.Н., Сергеев О.С. Стресс и состояние иммунной системы в норме и патологии. Краткий обзор литературы. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье*. 2017; 25(1): 82–90. <https://elibrary.ru/yfzhh>
5. Семинский И.Ж., Серебренникова С.Н., Гузовская Е.В., Семенов Н.В. Роль цитокинов в патогенезе заболеваний. *Байкальский медицинский журнал*. 2015; (1): 14–17. <https://elibrary.ru/ucnefz>
13. Голубенко М.В., Степанов В.А., Макеева О.А., Пузырев В.П. ДНК-чип для исследования структуры наследственной предрасположенности к сердечно-сосудистым заболеваниям. В кн: *Молекулярно-биологические технологии в медицинской практике*. Новосибирск; Альфа Виста Н. 2009; Вып. 13: 42–9. <https://elibrary.ru/zgetih>
15. Гагулин И.В., Громова Е.А., Гафарова А.В., Гафаров В.В. Полиморфизм *G308A* гена фактора некроза опухоли α и депрессия в открытой популяции мужчин 25–64 лет г. Новосибирска (эпидемиологическое исследование по программе ВОЗ MONICA-psycho-social). *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2018; 10(1): 43–46. <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2018-1-43-46> <https://elibrary.ru/etgclca>
16. Наумова О.В., Бодиевкова Г.М., Боклаженко Е.В., Шевченко О.И. Связь когнитивных нарушений у пациентов с вибрационной болезнью с содержанием цитокинов, нейротрофинов и антител к белкам нервной ткани. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1313–1318. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1313-1318> <https://elibrary.ru/zksmoa>
17. Мухаммадиева Г.Ф., Шайхлисламова Э.Р., Каримов Д.Д., Каримов Д.О., Репина Э.Ф., Якупова Т.Г. и др. Прогнозирование риска развития вибрационной болезни и вегетативно-сенсорной полинейропатии при вибрационном воздействии с использованием анализа полиморфизма кандидатных генов. *Анализ риска здоровья*. 2024; (2): 111–121. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.2.10> <https://elibrary.ru/qobthe>
18. Георгиевский А.Б. К истории закона Харди-Вейнберга. *Историко-биологические исследования*. 2011; (1): 63–75. <https://www.elibrary.ru/oodbyd>
20. Табиханова Л.Э., Осипова Л.П., Чуркина Т.В., Ковалев С.С., Филипенко М.Л., Воронина Е.Н. Повышенные частоты аллелей –174G и –572C гена *IL6* в популяциях коренных народов Сибири по сравнению с русскими. *Молекулярная биология*. 2023; 57(2): 350–359. <https://doi.org/10.31857/S0026898423020210> <https://elibrary.ru/eeihah>
27. Кетлинский С.А., Симбирцев А.С. *Цитокины*. Санкт-Петербург.: Фолиант; 2008. <https://elibrary.ru/qkqwjl>
28. Колесникова Л.Р. Стресс-индуцированные изменения жизнедеятельности организма. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2018; 17(4): 30–36. <https://elibrary.ru/yjrinjv>
29. Бодиевкова Г.М., Чистова Н.П., Боклаженко Е.В., Лахман О.Л., Анализ ассоциации некоторых полиморфных вариантов генов дофаминергической сети (*DRD2 rs1800497*, *DRD4 rs1800955*, *CNTF rs1800169*) с уровнями дофамина и *CNTF* у пациентов с вибрационной болезнью. *Нейрохимия*. 2025; 42(3): 536–543. <https://doi.org/10.7868/S3034556125030202> <https://elibrary.ru/zikdyd>

## References

1. Azovskova T.A., Vakurova N.V., Lavrenteva N.E. On the modern aspects of the diagnosis and classification of vibration disease. *Russkij medicinskij zhurnal*. 2014; 22(16): 1206–1209. <https://elibrary.ru/skboqf> (in Russian)
2. Bodienkova G.M., Boklachenko E.V. Altered serum levels of neuronal proteins and antibodies to them in occupational diseases of the nervous system. *Biomeditsinskaya Khimiya*. 2024; 70(2): 109–113. <https://doi.org/10.18097/PBMC20247002109> <https://elibrary.ru/kzpzaf> (in Russian)
3. Shevchenko O.I., Rusanova D.V., Lakhman O.L. Assessment of neurofunctional activity in patients with vibration disease caused of local vibration. *Med. Truda i prom. ekol*. 2023; 63(11): 709–714. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-11-709-714> <https://elibrary.ru/brfvsc> (in Russian)
4. Prokhorenko I.O., Germanova V.N., Sergeev O.S. Stress and the state of the immune system are normal and pathological. Summary of literature. *Bulletin of the REAVIZ Medical Institute: rehabilitation, doctor and health*. 2017; 25(1): 82–90. <https://elibrary.ru/yfzhh> (in Russian)
5. Seminskii I.Zh., Serebrennikova S.N., Guzovskaya Ye.V. The role of cytokines in the pathogenesis of disease. *Baikal Medical Journal*. 2015; (1): 14–17. <https://elibrary.ru/ucnefz> (in Russian)
6. Jung Y.H., Shin N.Y., Jang J.H., Lee W.J., Lee D., Choi Y. et al. Relationships among stress, emotional intelligence, cognitive intelligence, and cytokines. *Medicine (Baltimore)*. 2019; 98(18): e15345. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000015345>
7. Barnes J., Mondelli V., Pariante C.M. Genetic contributions of inflammation to depression. *Neuropsychopharmacology*. 2017; 42(1): 81–98. <https://doi.org/10.1038/npp.2016.169>
8. Dowlati Y., Herrmann N., Swardfager W., Liu H., Sham L., Reim E.K. et al. A meta-analysis of cytokines in major depression. *Biol. Psychiatry*. 2010; 67(5): 446–457. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.09.033> <https://elibrary.ru/naubpp>
9. Trovato M., Sciacchitano S., Facciola A., Valenti A., Visalli G., Di Pietro A. Interleukin-6 signalling as a valuable cornerstone for molecular medicine (Review). *Int. J. Mol. Med*. 2021; 47(6): 107. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2021.4940> <https://elibrary.ru/hzraar>
10. Harun-Or-Roshid M., Mollah M.N.H., Jesmin. A comprehensive meta-analysis comprising 149 case-control studies to investigate the association between *IL-6* gene rs1800795 polymorphism and multiple disease risk. *Gene*. 2023; 861: 147234. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147234> <https://elibrary.ru/vtglgu>
11. Bozovic I., Perovic V., Basta I., Peric S., Stevic Z., Popadic D. et al. Cytokine gene polymorphisms in patients with chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy. *Cells*. 2023; 12(16): 2033. <https://doi.org/10.3390/cells12162033> <https://elibrary.ru/ggfkxw>
12. Hajeer A.H., Hutchinson I.V. Influence of *TNF alpha* gene polymorphisms on *TNF alpha* production and disease. *Hum Immunol*. 2001; 62(11): 1191–9. [https://doi.org/10.1016/S0198-8859\(01\)00322-6](https://doi.org/10.1016/S0198-8859(01)00322-6) <https://elibrary.ru/yefvga>
13. Golubenkov M.V., Stepanov V.A., Maakeeva O.A., Puzirev V.P. The DNA-micro array for research of structure of hereditary predisposition to cardiovascular diseases. In: *Molecular and biological technologies in medical practice*. Novosibirsk; Alpha Vista H. 2009; 13:42–9. <https://elibrary.ru/zgetih> (in Russian)
14. Liu Z.H., Ding Y.L., Xiu L.C., Pan H.Y., Liang Y., Zhong S.Q. et al. A meta-analysis of the association between *TNF-α-308G>A* polymorphism and type 2 diabetes mellitus in Han Chinese population. *PLoS One*. 2013; 8(3): e59421. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059421>
15. Gagulin I.V., Gromova E.A., Gafarova A.V., Gafarov V.V. *G308A* tumor necrosis factor-α gene polymorphism and depression in an open male population aged 25–64 years from Novosibirsk (an epidemiological study according to the WHO MONICA-psycho-social program). *Neurologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika*. 2018; 10(1): 43–46. <https://doi.org/10.14412/2074-2711-2018-1-43-46> <https://elibrary.ru/etgclca> (in Russian)
16. Naumova O.V., Bodienkova G.M., Boklachenko E.V., Shevchenko O.I. The association between cognitive impairments in patients with vibration disease

- with the content of cytokines, neurotrophins, and antibodies to nervous tissue proteins. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(10): 1313–1318. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1313-1318> <https://elibrary.ru/zksmoa> (in Russian).
17. Mukhammadiyeva G.F., Shaikhislamova E.R., Karimov D.D., Karimov D.O., Repina E.F., Yakupova T.G. i dr. Predicting the risk of developing vibration disease and vegetative-sensory polyneuropathy under vibration exposure using analysis of candidate gene polymorphism. *Health Risk Analysis*. 2024; (2): 109–116. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.2.10.eng> <https://elibrary.ru/qobthe>
  18. Georgijevsky A.B. The background of the Hardy-Weinberg law. *Istoriko-biologicheskie issledovaniya*. 2011; (1): 63–75. <https://elibrary.ru/oodbyd> (in Russian)
  19. Bennermo M., Held C., Stemme S., Ericsson C.G., Silveira A., Green F. et al. Genetic predisposition of the interleukin-6 response to inflammation: implications for a variety of major diseases? *Clin Chem*. 2004; 50(11): 2136–2140. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2004.037531>
  20. Tabikhanova L.E., Osipova L.P., Churkina T.V., Kovalev S.S., Filipenko M.L., Voronina E.N. Increased frequencies of the –174G and –572C IL6 alleles in populations of indigenous peoples of Siberia compared to russians. *Molecular Biology*. 2023; 57(2): 329–337. <https://doi.org/10.1134/s002689332302019x> <https://elibrary.ru/eeihat> (in Russian)
  21. Abecasis G.R., Auton A., Brooks L.D., DePristo M.A., Durbin R.M., Handsaker R.E. et al. 1000 Genomes Project Consortium. An integrated map of genetic variation from 1,092 human genomes. *Nature*. 2012; 491(7422): 56–65. <https://doi.org/10.1038/nature11632>
  22. Zhao X., Wang H., Sun G., Zhang J., Edwards N.J., Aronowski J. Neuronal interleukin-4 as a modulator of microglial pathways and ischemic brain damage. *Journal of Neuroscience*. 2015; 35(32): 11281–11291. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1685-15.2015>
  23. Wachholz S., Knorr A., Mengert L., Plümper J., Sommer R., Juckel G. et al. Interleukin-4 is a participant in the regulation of depressive-like behavior. *Behavioural brain research*. 2017; 326: 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2017.03.020>
  24. Li Z., Liu F., Ma H., White P.F., Yumul R., Jiang Y. et al. Age exacerbates surgery-induced cognitive impairment and neuroinflammation in sprague-dawley rats: the role of IL-4. *Brain Res*. 2017; 1665: 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.04.004>
  25. Wu J.C., Zhang X., Wang J.H., Liu Q.W., Wang X.Q., Wu Z.Q. et al. Gene polymorphisms and circulating levels of the TNF-alpha are associated with ischemic stroke: A meta-analysis based on 19,873 individuals. *Int Immunopharmacol*. 2019; 75: 105827. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2019.105827>
  26. Hu L., Li B., Liao X., Yan J. Polymorphisms of inflammatory cytokine genes and risk for intracranial aneurysm: a systematic review and meta-analysis. *Yonsei Med. J*. 2020; 61(5): 391–399. <https://doi.org/10.3349/ymj.2020.61.5.391> <https://elibrary.ru/lvepgu>
  27. Ketlinskii, S.A. Simbirtsev A.S. *Cytokines [Tsitokini]*. Sankt-Peterburg: Foliant; 2008. <https://elibrary.ru/qkqwlj> (in Russian)
  28. Kolesnikova L.R. Stress-induced changes in the life of the body. *Vestnik Smolenskoi gosudarstvennoi meditsinskoi akademii*. 2018; 17(4): 30–36. <https://elibrary.ru/yryjnv> (in Russian)
  29. Bodienkova, G. M., Chistova N.P., Boklazhenko E.V., Lakhman, O.L. Association analysis of some polymorphic variants of dopaminergic network genes (*DRD2 rs1800497*, *DRD4 rs1800955*, *CNTF rs1800169*) with Dopamine and CNTF levels in patients with vibration disease. *Neurochemical Journal*. 2025; 42(3): 536–543. <https://doi.org/10.7868/S3034556125030202> <https://elibrary.ru/zikdyd> (in Russian).
  30. Miller A.H., Haroon E., Raison C.L., Felger J.C. Cytokine targets in the brain: Impact on neurotransmitters and neurocircuits. *Depress Anxiety*. 2013; 30(4): 297–306. <https://doi.org/10.1002/da.22084>

## Сведения об авторах

**Наумова Ольга Вячеславовна**, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. иммуно-биохимических и молекулярно-генетических исследований в гигиене ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: [immun11@yandex.ru](mailto:immun11@yandex.ru)

**Бодиевкова Галина Михайловна**, доктор мед. наук, профессор, зав. лаб. иммуно-биохимических и молекулярно-генетических исследований в гигиене ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия

**Боклаженко Елена Валерьевна**, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. лаб. иммуно-биохимических и молекулярно-генетических исследований в гигиене ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия

## About the authors

**Olga V. Naumova**, PhD (Biology), researcher, Laboratory of Immuno-Biochemical and Molecular Genetic Research in Hygiene, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research. Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5353-2268> E-mail: [immun11@yandex.ru](mailto:immun11@yandex.ru)

**Galina M. Bodienkova**, DSc (Medicine), professor, head, Laboratory of Immuno-Biochemical and Molecular Genetic Research in Hygiene, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research. Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0428-3063>

**Elena V. Boklazhenko**, PhD (Medicine), senior researcher, Laboratory of Immuno-Biochemical and Molecular Genetic Research in Hygiene, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research. Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2025-8303>



Черняк Ю.И., Зуева Я.И., Загузина А.Р.

## Ассоциация полиморфного варианта Ala16Val гена супероксиддисмутазы 2 (rs4880) с изменениями структуры нервов у пациентов с вибрационной болезнью

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Установленные ранее ассоциации между генотипами полиморфных вариантов генов глутатион-S-трансфераз (GSTs) с изменением структуры нервов верхних конечностей у пациентов с вибрационной болезнью (ВБ) позволяют предположить существование подобных взаимосвязей для полиморфизмов генов, кодирующих активность других ферментов антиоксидантной защиты, в частности митохондриальной супероксиддисмутазы (SOD2).

**Цель работы** — установить ассоциации полиморфного варианта SOD2 с изменением структуры нервов у пациентов с ВБ, обусловленной воздействием различных видов вибрации.

**Материалы и методы.** Методом ПЦР-РВ изучен полиморфный вариант rs4880 гена SOD2 у 247 мужчин. Обследованы пациенты с ВБ, обусловленной воздействием локальной вибрации (ВБлок; n = 94) и комбинированным воздействием вибрации (ВБкомб; n = 65), а также лица контрольной группы (n = 88). Структуру срединного и локтевого нервов верхних конечностей оценивали с помощью УЗИ по площади поперечного сечения (ППС).

**Результаты.** В изученных условиях установлена значимая роль полиморфного варианта Ala16Val гена SOD2 в развитии структурных изменений нервов верхних конечностей при ВБ. Наиболее значимые изменения выявлены у носителей всех генотипов rs4880 (CC, CT и TT) в группе пациентов с ВБлок по сравнению с контролем, выражающиеся в большей ППСтах срединного, локтевого нервов и средней ППС периферических нервов (p = 0,005; p = 0,013 и p = 0,004 соответственно). Носительство TT-генотипа сопровождалось более выраженными изменениями указанных параметров по сравнению с контролем как у пациентов с ВБлок, так и у пациентов объединённой группы (ВБлок + ВБкомб).

**Ограничения исследования.** Число обследованных лиц, отсутствие анализа электрофизиологических изменений.

**Заключение.** Носительство TT-генотипа полиморфного варианта rs4880 гена SOD2 ассоциировано с изменением структуры нервов верхних конечностей у пациентов с ВБлок и в группе ВБлок + ВБкомб, что может быть связано со снижением активности SOD2, сопровождающейся усилением окислительного повреждения.

**Ключевые слова:** вибрационная болезнь; генетический полиморфизм; супероксиддисмутазы 2; полинейропатия

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным комитетом по биомедицинской этике ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований» (заключение ЛЭК № 5 от 21.03.2023 г.). Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Черняк Ю.И., Зуева Я.И., Загузина А.Р. Ассоциация полиморфного варианта Ala16Val гена супероксиддисмутазы 2 (rs4880) с изменениями структуры нервов у пациентов с вибрационной болезнью. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 999–1004. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-999-1004> <https://elibrary.ru/airaum>

**Для корреспонденции:** Черняк Юрий Ильич, e-mail: yuri\_chernyak@hotmail.com

**Вклад авторов:** Черняк Ю.И. — концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, статистическая обработка, написание текста, редактирование; Зуева Я.И. — дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, написание текста, редактирование; Загузина А.Р. — сбор материала и статистическая обработка данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ (№ 123032000007–8).

Поступила: 30.07.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Yury I. Chernyak, Yanina I. Zueva, Anna R. Zaguzina

## Association of the Ala16Val polymorphism in superoxide dismutase 2 gene (rs4880) with nerve structure changes in patients with vibration syndrome

East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Previously, data were obtained on the association between genotypes of polymorphic variants of glutathione-S-transferases (GSTs) genes with changes in nerve structure of the upper limbs in patients with vibration syndrome (VS). This suggests the existence of similar relationships for polymorphisms of genes encoding the activity of other antioxidant enzymes, mitochondrial superoxide dismutase (SOD2) in particular.

**The aim of the study** was to establish associations between the polymorphic variant of SOD2 gene and changes in nerve structure in VS patients which is caused by exposure to various vibration types.

**Materials and methods.** The polymorphic variant Ala16Val of SOD2 gene (rs4880) in two hundred forty seven: VS patients (caused by exposure to hand-arm vibration (HAVS) (n = 94) and combined vibration (hand-arm and whole body vibration – VScmb (n = 65)), and control individuals (n = 88) were studied by RT-PCR method. The structure of the median and ulnar nerves of the upper limbs was assessed by using ultrasonography and the results were expressed as the cross-sectional area (CSA).

**Results.** A significant role of the Ala16Val polymorphic variant of SOD2 gene was established in the development of nerve structural changes of upper limbs in VS patients. The most pronounced changes were revealed in carriers of all rs4880 genotypes (CC, CT, and TT) in HAVS patients relative to the control, which was manifested in greater CSAmx of the median, ulnar, and average peripheral nerves CSA (p = 0.005, p = 0.013, and p = 0.004, respectively). Carriage of the TT genotype was accompanied by greater values of all the above parameters compared to the control both in HAVS patients and patients with combined vibration exposure.

**Limitations.** The number of examined individuals, the lack of analysis of electrophysiological changes.

**Conclusion.** The TT genotype carriage of the polymorphic variant rs4880 of SOD2 gene is associated with an increase in the nerve structure parameters of upper limbs both in HAVS patients and in patients of combined group. This may be due to a decrease in SOD2 activity, accompanied by increased oxidative damage.

**Keywords:** vibration syndrome; genetic polymorphism; superoxide dismutase 2; polyneuropathy

**Compliance with ethical standards.** The study was approved by the Biomedical Ethics Committee of the East Siberian Institute of Medical and Ecological Research (Protocol No. 5 of 03/21/2023). All participants gave informed voluntary written consent to participate in the study.

**For citation:** Chernyak Yu.I., Zueva Ya.I., Zaguzina A.R. Association of the Ala16Val polymorphism in superoxide dismutase 2 gene (rs4880) with nerve structure changes in patients with vibration syndrome. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 999–1004. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-999-1004> <https://elibrary.ru/airaum> (In Russ.)

**For correspondence:** Yuri I. Chernyak, e-mail: yuri\_chernyak@hotmail.com

**Contribution:** Chernyak Yu.I. — concept and study design, sample collection, implementation of methods and data analysis, final statistical data analysis, text writing and editing; Zueva Ya.I. — study design, sample collection, implementation of methods and data analysis, final statistical data analysis, text writing and editing; Zaguzina A.R. — sample collection, statistical data analysis. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Funding.** The study was supported within a framework of State Assignment for East Siberian Institute of Medical and Ecological Research (No. 123032000007-8).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Received: July 30, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Вибрационная болезнь (ВБ) — одна из наиболее распространенных профессиональных патологий у работников, подвергающихся воздействию вибрации, и хронический стрессорный фактор, обуславливающий развитие оксидативного стресса [1]. Принципиально, что при одинаковых условиях труда клиническая форма ВБ развивается лишь у части работников. Этот факт предполагает наличие генетической предрасположенности у носителей неблагоприятных генотипов заинтересованных генов. Ранее у пациентов с ВБ была установлена ассоциация некоторых полиморфных вариантов генов глутатион-S-трансфераз (GSTs) с показателями, характеризующими изменение структуры нервов верхних конечностей [2]. Такие данные позволяют предположить существование подобных взаимосвязей для полиморфных вариантов генов, кодирующих другие ферменты антиоксидантной защиты. Среди последних особую роль играют супероксиддисмутазы (SOD), представляющие собой семейство ферментов. К настоящему времени обнаружены три различные изоформы SOD: внеклеточная (SOD3), марганцевая (SOD2, или MnSOD) и медно-цинковая (SOD1) супероксиддисмутазы [3, 4]. Они эффективно нейтрализуют супероксидные анион-радикалы путём катализа реакции дисмутации, поддерживая их концентрацию на физиологически низком уровне.

Ген SOD2, кодирующий марганцевую супероксиддисмутазу, локализован на 6-й хромосоме (6q25.3) и имеет около 60 однонуклеотидных мутаций, которые обуславливают дифференциальную экспрессию и активность фермента. Наиболее значимыми однонуклеотидными заменами считаются rs4880 (Ala16Val) и rs5746136 (Ile58Thr), локализующиеся в кодирующих областях и оказывающие влияние на функцию и структуру фермента [5]. В промоторной области идентифицируются полиморфизмы rs5746094 и rs5746092, которые способны изменять эффективность транскрипции и уровень экспрессии гена. Полиморфизм Ala16Val (rs4880) представляет собой замену аминокислоты в 16-м положении с аланина (GCT) на валин (GTT) [6]. Носительство аллели Val обуславливает сниженную активность фермента, что связано с изменением конформации вторичной структуры сигнального пептида, которое препятствует его переносу из цитоплазмы в митохондриальный матрикс [7].

В проведённых ранее исследованиях было обнаружено, что полиморфный вариант rs4880 связан с рядом патологий, в развитии которых ключевую роль играет окислительный стресс. В частности, установлена значимая связь носительства аллели Val с риском диабетических микрососудистых осложнений, ишемической болезнью при диабете [8]. Носительство же аллели Ala ассоциировано с повышенным риском рака желудка и некоторых других видов рака [9]. Ранее было показано, что носительство аллели Val и генотипа Val/Val названного полиморфизма ассоциировано с риском

развития ВБ в ранние сроки [1]. С учётом вышеизложенного актуально изучение связи полиморфного варианта rs4880 гена SOD2 с выявленными изменениями структуры нервов верхних конечностей у пациентов с ВБ.

**Цель работы** — установить ассоциации полиморфного варианта гена SOD2 с развитием нарушений структуры нервов у пациентов с ВБ, обусловленной воздействием различных видов вибрации.

## Материалы и методы

Исследование выполнено на выборке из 247 мужчин. В неё вошли пациенты с ВБ, обусловленной воздействием локальной (ВБлок;  $n = 94$ ) и комбинированным воздействием локальной и общей вибрации (ВБкомб;  $n = 65$ ), а также лица контрольной группы ( $n = 88$ ). Профессии пациентов с ВБ, условия включения и исключения для контрольной группы изложены в нашей работе [2]. Забор крови, метод выделения ДНК также были описаны ранее [10]. Генотипирование полиморфного варианта гена rs4880 гена SOD2 с использованием набора от «Синтол» (Россия), дискриминацию аллелей выполняли на оборудовании для проведения ПЦР в режиме реального времени C100 Thermal Cycler и CFX96 Real-Time System (Bio-Rad, США). Повторный анализ произвольно отобранных образцов не выявил ошибок в интерпретации результатов. Оценка структуры периферических нервов верхних конечностей (срединного и локтевого), выраженных как площадь поперечного сечения нерва (ППС), у обследованных лиц детально представлена в наших работах [2, 10].

Проверку соответствия равновесию Харди — Вайнберга ( $\chi^2$ -тест) выполняли с помощью онлайн-калькулятора [11]. Для статистической обработки полученных результатов использовали ППП Statistica 10 (StatSoft, США). Непараметрический  $U$ -критерий Манна — Уитни применяли при межгрупповых сравнениях. Результаты представляли в виде медианы и интерквартильного размаха [ $Me$  ( $LQ_{25}$ — $UQ_{75}$ )]. Статистически значимыми считались различия при  $p < 0,05$  ( $p < 0,017$  с учётом поправки Бонферрони).

## Результаты

Распределение частот генотипов полиморфизма Ala16Val гена SOD2 (rs4880) в обследованных группах, в том числе в объединённой группе пациентов с вибрационной болезнью (ВБлок + ВБкомб), соответствовало равновесию Харди — Вайнберга. Проведённый анализ не выявил значимых различий в частоте аллелей и генотипов для изученного полиморфизма как между пациентами с вибрационной болезнью (ВБлок + ВБкомб) и индивидами контрольной группы, так и при межгрупповом сравнении трёх обследованных групп.

Таблица 1 / Table 1

**Возраст, стажевые характеристики и параметры структуры нервов пациентов с ВБлок в зависимости от генотипов полиморфизма Ala16Val гена SOD2, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)**Age, vibration exposure duration, and nerve structure parameters in HAVS patients depending on genotype of SOD2 Ala16Val polymorphism, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)

| Показатель   Index                                                                                          | CC (Ala/Ala)               | CT (Ala/Val)              | TT (Val/Val)                  | $p_{1-2}$ | $p_{1-3}$ | $p_{2-3}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Возраст, лет<br>Age, years                                                                                  | 47 (40–51)<br>$n = 19$     | 43 (40–49)<br>$n = 47$    | 45 (41–48)<br>$n = 27$        | 0.387     | 0.531     | 0.450     |
| Стаж в контакте с вибрацией, лет<br>Length service in contact with vibration duration, years                | 19 (15–22)<br>$n = 19$     | 19 (16–20)<br>$n = 47$    | 18.5 (16.5–20)<br>$n = 26$    | 0.422     | 0.475     | 0.821     |
| Стаж на момент постановки диагноза, лет<br>Length service at the moment of making diagnosis, years          | 16.8 (12.2–21)<br>$n = 19$ | 15 (14–17)<br>$n = 47$    | 15.9 (14.2–18)<br>$n = 26$    | 0.479     | 0.818     | 0.537     |
| ППСмах срединного нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the median nerve, mm <sup>2</sup>                | 12 (11–13)<br>$n = 19$     | 11 (9–13)<br>$n = 47$     | 12 (9–13)<br>$n = 27$         | 0.128     | 0.744     | 0.302     |
| ППСмах локтевого нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the ulnar nerve, mm <sup>2</sup>                  | 11 (8.5–15)<br>$n = 19$    | 9 (8–12)<br>$n = 47$      | 11 (9–14)<br>$n = 27$         | 0.136     | 0.822     | 0.064     |
| Средняя ППС периферических нервов, мм <sup>2</sup><br>Average CSA of the peripheral nerves, mm <sup>2</sup> | 10.5 (9–12.5)<br>$n = 19$  | 9.25 (8.5–11)<br>$n = 47$ | 10.75 (9.5–11.75)<br>$n = 27$ | 0.047     | 0.938     | 0.013     |

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: ППС — площадь поперечного сечения.  $p_{1-2}$ ;  $p_{1-3}$ ;  $p_{2-3}$  — уровень статистической значимости различий между показателями индивидов с генотипами CC относительно CT, CC и TT, CT и TT соответственно ( $U$ -критерий Манна — Уитни).

Note: Here and in Tables 2, 3: CSA — cross-sectional area,  $p_{1-2}$ ;  $p_{1-3}$ ;  $p_{2-3}$  the significance level of differences between the indices of CC genotype carriers compared to CT, CC vs TT, as well as the CT vs TT, respectively (Mann — Whitney  $U$  test).

Таблица 2 / Table 2

**Возраст, стажевые характеристики и параметры структуры нервов пациентов с вибрационной болезнью и лиц контрольной группы в зависимости от носительства генотипа полиморфизма Ala16Val гена SOD2, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)**Age, vibration exposure duration, and nerve structure parameters in patients with vibration syndrome and individuals in control group depending on genotype carriage of SOD2 Ala16Val polymorphism, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)

| Показатель   Index                                                                                          |                    | CC (Ala/Ala)                | CT (Ala/Val)              | TT (Val/Val)                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Возраст, лет<br>Age, years                                                                                  | ВБлок   HAVS       | 47 (40–51), $n = 19$        | 43 (40–49), $n = 47$      | 45 (41–48), $n = 27$        |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 56 (54–57), $n = 18$        | 55 (53–57), $n = 35$      | 56 (48–57), $n = 12$        |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 47 (45.5–50.5), $n = 20$    | 45.5 (42–48), $n = 44$    | 46.5 (40–49), $n = 18$      |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | < 0.001                     | < 0.001                   | < 0.001                     |
|                                                                                                             | $p_{1-3}$          | 0.397                       | 0.194                     | 0.763                       |
|                                                                                                             | $p_{2-3}$          | < 0.001                     | < 0.001                   | 0.007                       |
| Стаж в контакте с вибрацией, лет<br>Length service in contact with vibration duration, years                | ВБлок   HAVS       | 19 (15–22), $n = 19$        | 19 (16–20), $n = 47$      | 18.5 (16.5–20), $n = 26$    |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 30 (26–33), $n = 17$        | 28 (23–31), $n = 35$      | 27 (24.5–31.5), $n = 12$    |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | < 0.001                     | < 0.001                   | < 0.001                     |
| Стаж на момент постановки диагноза, лет<br>Length service at the moment of making diagnosis, years          | ВБлок   HAVS       | 16.8 (12.2–21), $n = 19$    | 15 (14–17), $n = 47$      | 15.9 (14.2–18), $n = 26$    |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 29 (26.4–31.8), $n = 17$    | 27 (21–30), $n = 35$      | 26.6 (22–31), $n = 12$      |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | < 0.001                     | < 0.001                   | < 0.001                     |
| ППСмах срединного нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the median nerve, mm <sup>2</sup>                | ВБлок   HAVS       | 12 (11–13), $n = 19$        | 11 (9–13), $n = 47$       | 12 (9–13), $n = 27$         |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 10.5 (10–12), $n = 18$      | 11.5 (10–14), $n = 35$    | 10 (9–13), $n = 12$         |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 10 (8.5–11.5), $n = 20$     | 9 (8–11), $n = 44$        | 9 (8–10.5), $n = 18$        |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | 0.027                       | 0.401                     | 0.274                       |
|                                                                                                             | $p_{1-3}$          | 0.005                       | 0.013                     | 0.004                       |
|                                                                                                             | $p_{2-3}$          | 0.158                       | 0.002                     | 0.239                       |
| ППСмах локтевого нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the ulnar nerve, mm <sup>2</sup>                  | ВБлок   HAVS       | 11 (8.5–15), $n = 19$       | 9 (8–12), $n = 47$        | 11 (9–14), $n = 27$         |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 9.5 (8–12), $n = 18$        | 10 (8–13), $n = 35$       | 10 (7.25–14), $n = 12$      |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 8 (7.5–11), $n = 20$        | 8.5 (7–10), $n = 44$      | 7.5 (6–10), $n = 18$        |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | 0.240                       | 0.222                     | 0.482                       |
|                                                                                                             | $p_{1-3}$          | 0.060                       | 0.067                     | 0.001                       |
|                                                                                                             | $p_{2-3}$          | 0.287                       | 0.003                     | 0.088                       |
| Средняя ППС периферических нервов, мм <sup>2</sup><br>Average CSA of the peripheral nerves, mm <sup>2</sup> | ВБлок   HAVS       | 10.5 (9–12.5), $n = 19$     | 9.25 (8.5–11), $n = 47$   | 10.75 (9.5–11.75), $n = 27$ |
|                                                                                                             | ВБкомб   VScomb    | 9.6 (8.5–10.25), $n = 18$   | 10.25 (8.75–12), $n = 35$ | 9.42 (8.05–11.3), $n = 12$  |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 9.25 (8.75–10.75), $n = 20$ | 9 (8–10.75), $n = 44$     | 8.38 (8–10.5), $n = 18$     |
|                                                                                                             | $p_{1-2}$          | 0.094                       | 0.138                     | 0.136                       |
|                                                                                                             | $p_{1-3}$          | 0.088                       | 0.276                     | 0.001                       |
|                                                                                                             | $p_{2-3}$          | 0.826                       | 0.025                     | 0.243                       |

Примечание:  $p_{1-2}$ ;  $p_{1-3}$ ;  $p_{2-3}$  — уровень статистической значимости различий между показателями пациентов с ВБлок и ВБкомб, пациентов с ВБлок и контрольной группой, ВБкомб и контрольной группой соответственно ( $U$ -критерий Манна — Уитни).

Note:  $p_{1-2}$ ;  $p_{1-3}$ ;  $p_{2-3}$  the significance level of differences between the indices of HAVS patients compared to VScomb patients, HAVS patients vs control, as well as the VScomb patients vs control, respectively (Mann–Whitney  $U$  test).

Таблица 3 / Table 3

**Возраст и параметры структуры нервов пациентов с вибрационной болезнью (ВБлок + ВБкомб) и лиц контрольной группы в зависимости от носительства генотипа полиморфизма, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)**

**Age, and nerve structure parameters in patients with vibration syndrome (HAVS + VScomb) and individuals in control group depending on genotype of SOD2 Ala16Val polymorphism, Me (LQ<sub>25</sub>–UQ<sub>75</sub>)**

| Показатель   Index                                                                                          |                    | CC (Ala/Ala), n = 37/20 | CT (Ala/Val), n = 82/44 | TT (Val/Val), n = 39/18 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Возраст, лет<br>Age, years                                                                                  | ВБ   VS            | 53 (47–56)              | 50 (42–55)              | 47 (42–53)              |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 47 (45.5–50.5)          | 45.5 (42–48)            | 46.5 (40–49)            |
|                                                                                                             | <i>p</i>           | 0.084                   | 0.005                   | 0.395                   |
| ППСmax срединного нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the median nerve, mm <sup>2</sup>                | ВБ   VS            | 11 (10–13)              | 11 (7–22)               | 12 (9–13)               |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 10 (8.5–11.5)           | 9 (8–11)                | 9 (8–10.5)              |
|                                                                                                             | <i>p</i>           | 0.012                   | 0.001                   | 0.008                   |
| ППСmax локтевого нерва, мм <sup>2</sup><br>Maximum CSA of the ulnar nerve, mm <sup>2</sup>                  | ВБ   VS            | 10 (8–13)               | 10 (8–12)               | 10 (8–14)               |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 8 (7.5–11)              | 8.5 (7–10)              | 7.5 (6–10)              |
|                                                                                                             | <i>p</i>           | 0.083                   | 0.006                   | 0.002                   |
| Средняя ППС периферических нервов, мм <sup>2</sup><br>Average CSA of the peripheral nerves, mm <sup>2</sup> | ВБ   VS            | 10 (9–11.5)             | 9.6 (8.6–11.25)         | 10.7 (8.9–11.5)         |
|                                                                                                             | Контроль   Control | 9.25 (8.75–10.75)       | 9 (8–10.75)             | 8.38 (8–10.5)           |
|                                                                                                             | <i>p</i>           | 0.251                   | 0.062                   | 0.005                   |

Примечание: *p* – уровень статистической значимости различий между показателями пациентов с вибрационной болезнью и контрольной группой (*U*-критерий Манна-Уитни).

Note. *p* – the significance level of differences between the indices of vibration syndrome compared to control (Mann–Whitney *U* test).

Далее для индивидов каждой группы мы проанализировали зависимость возраста, стажевых характеристик и параметров структуры нервов от носительства генотипов полиморфного варианта rs4880 гена *SOD2*. Данные, характеризующие названную зависимость в группе пациентов с ВБлок, представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, среди пациентов с ВБлок носители ТТ-генотипа имели значимо большую ППС периферических нервов по сравнению с носителями СТ-генотипа ( $p = 0,013$ ). Сравнение названного показателя позволило также выявить выраженную тенденцию к повышению ППС у носителей СС-генотипа по сравнению с пациентами с СТ-генотипом ( $p = 0,047$ ). Подобный анализ в группе пациентов с ВБкомб не выявил каких-либо различий показателей в зависимости от генотипов rs4880. В контрольной группе установлено, что носители СС-генотипа были старше таковых с генотипом СТ ( $p = 0,016$ ). В объединённой группе пациентов с ВБ также не выявлено различий изученных показателей. При этом отмечена выраженная тенденция к снижению возраста пациентов с ТТ-генотипом по сравнению с носителями СС-генотипа ( $p = 0,026$ ).

На следующем этапе были проанализированы показатели обследованных групп в зависимости от генотипа rs4880 (табл. 2).

Как следует из табл. 2, среди носителей всех генотипов пациенты с ВБкомб были значимо старше как пациентов с ВБлок, так и индивидов контрольной группы, что аналогичным образом обусловило различия стажевых характеристик. При этом для всех трёх генотипов не было выявлено различий в возрасте пациентов с ВБлок и лиц контрольной группы. Последнее обосновывает возможность анализа различий между этими группами по характеризующим структуру нервов показателям, поскольку они не связаны с возрастными изменениями. Наиболее выраженные различия наблюдались для ППСmax срединного нерва, что проявилось в значимом повышении их значений для носителей всех генотипов у пациентов с ВБлок относительно контрольной группы. Для ППСmax локтевого нерва и средней ППС периферических нервов отличия, характеризующиеся изменениями той же направленности, установлены только у носителей генотипа ТТ.

Отметим, что одновременное повышение всех трёх исследованных параметров структуры нервов у пациентов с ВБлок относительно контрольной группы установлено только среди носителей ТТ-генотипа, который кодирует пониженную активность фермента.

Результаты подобного анализа для объединённой группы пациентов ВБ (ВБлок + ВБкомб) и контрольной группы приведены в табл. 3.

Представленные в табл. 3 данные свидетельствуют об отсутствии значимых различий в возрасте у носителей гомозиготных генотипов при сравнении пациентов с ВБ и контрольной группы. Как и в табл. 2, у пациентов с ВБлок для всех генотипов значения ППСmax срединного нерва превышали таковые в группе контроля. Если у носителей СС-генотипа отмечено значимое увеличение только ППСmax срединного нерва, то носительство ТТ-генотипа сопровождалось большими значениями всех изученных параметров структуры нервов у пациентов с ВБ. Следует отметить, что при сравнении носителей этого же генотипа подобные изменения наблюдались у пациентов с ВБлок относительно индивидов контрольной группы (см. табл. 2).

## Обсуждение

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о существовании ассоциации между ТТ-генотипом Ala16Val полиморфизма гена *SOD2* (кодирующего активность одного из ключевых ферментов АОС) и изменениями структуры нервов верхних конечностей у пациентов с ВБлок. Такие данные дополняют выполненную ранее оценку вклада полиморфных вариантов генов семейства глутатион-S-трансфераз (также принадлежащих к ферментативному звену АОС) в развитие подобных изменений при обследовании этой же когорты пациентов с ВБ [2].

Семейство супероксиддисмутаз представляет собой одно из первых звеньев защиты от супероксидных анион-радикалов, адаптации организма к воздействию повреждающих внешних факторов, реализация которых сопровождается активацией свободнорадикальных процессов и накоплением АФК. Периферические нервы выбраны объектом исследования из-за их уязвимости к окислительному повреждению, которое объясняется высокой энергетической потребностью в сочетании со значительной длиной аксонов и затруднённым внутриклеточным транспортом.

Установлено, что носители ТТ-генотипа среди пациентов с ВБлок имели значимо большую ППС периферических нервов по сравнению с носителями СТ-генотипа, а носительство СС-генотипа характеризовалось выраженной тенденцией к повышению названного показателя по отношению к таковому у пациентов с СТ-гетерозиготой.

Одновременное повышение всех трёх изученных параметров структуры нервов у пациентов с ВБлок относительно контрольной группы установлено только у носителей ТТ-генотипа, кодирующего пониженную активность фермента. Можно предположить, что при воздействии локальной вибрации в условиях повышенного уровня супероксид-аниона не обеспечивается его достаточная нейтрализация, что обуславливает дополнительное повреждение нервной ткани. К прямому повреждающему действию вибрации на миелиновую оболочку добавляются эффекты, среди которых наиболее значимыми являются: митохондриальная дисфункция, прямое повреждение липидов мембран, белков, ДНК, инактивация антиоксидантной системы, транскрипционного фактора Nrf2, шванновских клеток, индукция провоспалительных цитокинов [12]. В совокупности это приводит к изменениям структуры периферических нервов верхних конечностей в данной группе пациентов с ВБ. Подобный механизм влияния оксидативного стресса, приводящего к митохондриальной дисфункции, был установлен при изучении поражения слухового нерва у пациентов с профессиональной нейросенсорной тугоухостью [13].

Представлялось интересным сопоставить полученные в настоящей работе данные с результатами других исследований полиморфизма rs4880 у пациентов с ВБ в различных регионах РФ [1, 14–16]. Вариация относительной частоты минорной аллели С (Ala) у пациентов с ВБ составила от 0,34 до 0,54. Попытки выявления ассоциации между болезнью и носительством аллелей либо генотипов названного полиморфного варианта гена *SOD2* позволили получить сопоставимые результаты. Если в работе Потеряевой Е.Л. и соавт. (2015) была установлена ассоциация аллели Т и генотипа ТТ rs4880 с повышенным риском развития ВБ в ранние сроки, то Мухаммадиева Г.Ф. и соавт. (2024) предположили, что аллель Т является фактором риска развития ВБ для всей обследованной когорты [1, 14]. В исследовании Горбуновой А.М. и соавт. (2024) отмечено выраженное увеличение частоты генотипа Val/Val (ТТ) среди пациентов с коморбидным вариантом (совместно с артериальной гипертензией) патологии относительно контрольной группы [15].

## Заключение

Состояние ферментативного звена антиоксидантной системы организма является важным фактором защиты при окислительном стрессе, инициированном воздействием

вибрации. Изучение полиморфных вариантов генов, кодирующих активность антиоксидантных ферментов, позволяет выявить индивидов с потенциальным риском для здоровья в рамках персонализированных подходов профилактики профессиональной патологии.

Результаты, полученные в ходе данного исследования, свидетельствуют об отсутствии значимых различий по частоте аллелей и генотипов полиморфизма Ala16Val гена *SOD2* между пациентами с вибрационной болезнью и индивидами контрольной группы. В то же время установлена значимая роль названного варианта гена *SOD2* в развитии структурных изменений нервов верхних конечностей при вибрационной болезни, выявленных с помощью ультразвуковой визуализации. Носительство ТТ-генотипа сопровождалось большими значениями всех изученных параметров структуры нервов как у пациентов с ВБлок, так и у пациентов с ВБ в объединённой группе по сравнению с контрольной группой. Таким образом, значимое снижение активности *SOD2* у носителей гомозигот ТТ вызывает усиление окислительного повреждения и приводит к утолщению нерва.

Из-за способности АФК к трансформации достаточно сложно идентифицировать доминирующую форму в развитии окислительного стресса. Следовательно, патогенез последнего целесообразно рассматривать через совокупное воздействие всех АФК, поскольку изменение концентрации одной формы неизбежно связано с изменением уровня других [17]. Представляется целесообразным изучение у пациентов с ВБ совокупности функционально значимых полиморфных вариантов генов ферментативного звена АОС с анализом межгенных взаимодействий полиморфных локусов. Кроме того, актуальна оценка влияния генотипов не только на структуру, но и на функцию периферических нервов, особенно на скорость проведения.

Полиморфизм Ala16Val гена *SOD2* (rs4880) не укладывается в простую дихотомию «эффективная / неэффективная» аллель, а представляет собой эволюционно сбалансированный локус с контекстно-зависимыми эффектами [18]. Близкое к равновесному соотношение аллелей в популяциях и нелинейность биохимических ответов на стресс (физическую нагрузку) согласуются с гипотезой о балансирующем отборе, при котором селективное преимущество каждой аллели определяется специфическими средовыми условиями, интенсивностью стресса и статусом других звеньев антиоксидантной системы [19].

## Литература

(п.п. 4–9, 11–13, 17–19 см. References)

- Потеряева Е.Л., Смирнова Е.Л., Никифорова Н.Г. Прогнозирование формирования и течения вибрационной болезни на основе изучения генно-метаболических маркеров. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015; (6): 19–22. <https://elibrary.ru/ubemit>
- Черняк Ю.И., Зуева Я.И. Вклад полиморфных вариантов генов *GSTM1*, *GSTT1* и *GSTP1* в развитие нарушений структуры нервов у пациентов с вибрационной болезнью. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1302–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1302-1308> <https://elibrary.ru/fnonnj>
- Меньшикова Е.Б., Ланкин В.З., Зенков Н.К., Бондарь И.А., Круговых Н.Ф., Труфакин В.А. Окислительный стресс. Проксиданты и антиоксиданты. М.: Фирма «Слово»; 2006. 556 с. <https://elibrary.ru/qzdbbx>
- Черняк Ю.И., Зуева Я.И. Ассоциация полиморфных вариантов генов *GSTP1* и *GSTM1* с признаками туннельных синдромов у пациентов с вибрационной болезнью (пилотное исследование). *Гигиена и санитария*. 2024; 103(9): 987–91. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-987-991> <https://elibrary.ru/peyzjo>
- Мухаммадиева Г.Ф., Шайхлисламова Э.Р., Каримов Д.Д., Каримов Д.О., Якупова Т.Г., Валова Я.В. и др. Анализ ассоциаций полиморфизмов ряда генов-кандидатов с вибрационной болезнью. *Экология человека*. 2024; 31(10): 721–9. <https://doi.org/10.17816/humeco642869> <https://elibrary.ru/zsaxgu>
- Горбунова А.М., Герасименко О.Н., Шпагин И.С., Максимов В.Н., Медведкина М.С., Николаев Ю.А. Клинические, нутритивно-антропометрические показатели и частота встречаемости полиморфного локуса Ala16Val (rs4880) гена *MnSOD* при вибрационной болезни, коморбидной с артериальной гипертензией. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2024; 44(3): 151–60. <https://doi.org/10.18699/SSMJ20240317> <https://elibrary.ru/xnifwo>
- Кузьмина Л.П., Хотулева А.Г., Мили Х., Коляскина М.М., Кузьмина С.Н. Полиморфные варианты генов ферментов антиоксидантной защиты в прогнозировании развития вибрационной болезни и сопутствующих нарушений иммунного статуса. *International Journal of Medicine and Psychology*. 2026; 9(3): 76–82. <https://doi.org/10.58224/2658-3313-2026-9-3-76-82> <https://elibrary.ru/rvzzos>

## References

- Potieriaeva E.L., Smirnova E.L., Nikiforova N.G. Forecasting the formation and course of vibration disease based on the study of genetic and metabolic markers. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2015; (6): 19–22. (in Russian). <https://elibrary.ru/ubemit>
- Chernyak Yu.I., Zueva Ya.I., Lakhman O.L. Contribution of polymorphic variants of *GSTM1*, *GSTT1*, and *GSTP1* genes to the development of nerve structural disorders in patients with vibration disease. *Gigiena i sanitariya*. 2025; 104(10): 1302–8. (in Russian). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1302-1308> <https://elibrary.ru/fnonnj>

3. Menshchikova E.B., Lankin V.Z., Zenkov N.K., Bondar I.A., Krugoviykh N.F., Trufakin V.A. *Oxidative stress. Prooxidants and antioxidants [Oksidativnyy stress. Prooksidanty i antioksidanty]*. Moscow: Firma «Slovo»; 2006. 556 p. <https://elibrary.ru/qzdbbx> (in Russian)
4. Anwar S., Sarwar T., Khan A.A., Rahmani A.H. Therapeutic applications and mechanisms of superoxide dismutase (SOD) in different pathogenesis. *Biomolecules*. 2025; 15(8): e1130. <https://doi.org/10.3390/biom15081130> <https://elibrary.ru/jpiezw>
5. Işikli A., Kubat-Üzümlü A., Satman İ., Matur Z., Öge A.E., Küçükali C.İ., et al. A SOD2 polymorphism is associated with abnormal quantitative sensory testing in type 2 diabetic patients. *Noro Psikiyatr Ars*. 2018; 55(3): 2769. <https://doi.org/10.29399/npa.23027>
6. Gauba K., Gupta S., Shekhawat J., Dutt N., Yadav D., Nag V.L., et al. Gene expression, levels and polymorphism (Ala16Val) of mitochondrial superoxide dismutase in tuberculosis patients of Rajasthan. *Microbes Infect*. 2023; 25(4): e105075. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2022.105075> <https://elibrary.ru/iuyauq>
7. Sutton A., Imbert A., Igoudjil A., Descatoire V., Cazanave S., Pessayre D., et al. The manganese superoxide dismutase Ala16Val dimorphism modulates both mitochondrial import and mRNA stability. *Pharmacogenet Genomics*. 2005; 15(5): 3119. <https://doi.org/10.1097/01213011-200505000-00006>
8. Tian C., Fang S., Du X., Jia C. Association of the C47T polymorphism in SOD2 with diabetes mellitus and diabetic microvascular complications: a meta-analysis. *Diabetologia*. 2011; 54(4): 80311. <https://doi.org/10.1007/s00125-010-2004-5> <https://elibrary.ru/olipfb>
9. Xu Z., Zhu H., Luk J.M., Wu D., Gu D., Gong W., et al. Clinical significance of SOD2 and GSTP1 gene polymorphisms in Chinese patients with gastric cancer. *Cancer*. 2012; 118(22): 548996. <https://doi.org/10.1002/cncr.27599>
10. Chernyak Yu.I., Zueva Ya.I. Association of polymorphic variants of GSTP1 and GSTM1 genes with signs of tunnel syndromes in patients with vibration disease (pilot study). *Gigiena i sanitariya*. 2024; 103(9): 98791. (in Russian). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-987-991> <https://elibrary.ru/peyzjo>
11. Hardy-Weinberg equilibrium calculator for 2 alleles [electronic resource]. Available at: <https://www.had2know.org/academics/hardy-weinberg-equilibrium-calculator-2-alleles.html> (accessed 17 May 2026).
12. Lv W., Deng B., Duan W., Li Y., Liu Y., Li Z., et al. Schwann cell plasticity is regulated by a weakened intrinsic antioxidant defense system in acute peripheral nerve injury. *Neuroscience*. 2018; 382: 113. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2018.04.018>
13. Tan W.J.T., Song L. Role of mitochondrial dysfunction and oxidative stress in sensorineural hearing loss. *Hear Res*. 2023; 434: 108783. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2023.108783> <https://elibrary.ru/wwwxoba>
14. Mukhammadiyeva G.F., Shaikhislamova E.R., Karimov D.D., Karimov D.O., Yakupova T.G., Valova Y.V., et al. Analysis of associations between polymorphisms of candidate genes and vibration disease. *Ekologiya cheloveka*. 2024; 31(10): 7219. (in Russian). <https://doi.org/10.17816/humeco642869> <https://elibrary.ru/zsaxgu>
15. Gorbunova A.M., Gerasimenko O.N., Shpagin I.S., Medvedkina M.S., Maksimov V.N., Nikolaev Yu.A. Clinical, nutritional and anthropometric indicators and frequency of occurrence of the Ala16Val (rs4880) polymorphic locus of the MnSOD gene in vibration disease comorbid with arterial hypertension. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal*. 2024; 44(3): 15160. (in Russian). <https://doi.org/10.18699/SSMJ20240317> <https://elibrary.ru/xnifwo>
16. Kuzmina L.P., Khotuleva A.G., Mili H., Kolyaskina M.M., Kuzmina S.N. Polymorphic variants of genes encoding antioxidant defense enzymes in predicting the development of vibration disease and associated immune status disorders. *International Journal of Medicine and Psychology*. 2026; 9(3): 7682. (in Russian). <https://doi.org/10.58224/2658-3313-2026-9-3-76-82> <https://elibrary.ru/rvzzos>
17. Noctor G., Lelarge-Trouverie C., Mhamdi A. The metabolomics of oxidative stress. *Phytochemistry*. 2015; 112: 3353. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.09.002> <https://elibrary.ru/utyrvx>
18. Kim Y.S., Gupta Vallur P., Phalton R., Mythreye K., Hempel N. Insights into the dichotomous regulation of SOD2 in cancer. *Antioxidants*. 2017; 6(4): e86. <https://doi.org/10.3390/antiox6040086>
19. Bresciani G., González-Gallego J., da Cruz I.B., de Paz J.A., Cuevas M.J. The Ala16Val MnSOD gene polymorphism modulates oxidative response to exercise. *Clin Biochem*. 2013; 46(45): 33540. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2012.11.020>

## Сведения об авторах

**Черняк Юрий Ильич**, доктор биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. иммуно-биохимических и молекулярно-генетических исследований ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: [yuri\\_chernyak@hotmail.com](mailto:yuri_chernyak@hotmail.com)

**Зуева Янина Юзовна**, врач-ревматолог клиники ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: [mabtera83@gmail.com](mailto:mabtera83@gmail.com)

**Загузина Анна Руслановна**, ординатор клинко-диагностической лаборатории, ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: [zaguzina.anuta@yandex.ru](mailto:zaguzina.anuta@yandex.ru)

## About the authors

**Yuri I. Chernyak**, DSc (Biology), leading researcher, Laboratory of Immuno-Biochemical and Molecular Genetic Research, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9641-0327> E-mail: [yuri\\_chernyak@hotmail.com](mailto:yuri_chernyak@hotmail.com)

**Yanina I. Zueva**, rheumatologist, Clinic, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-5316-2548> E-mail: [mabtera83@gmail.com](mailto:mabtera83@gmail.com)

**Anna R. Zaguzina**, resident physician, Clinical Diagnostic Laboratory, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-3665-3586> E-mail: [zaguzina.anuta@yandex.ru](mailto:zaguzina.anuta@yandex.ru)



Шаяхметов С.Ф., Журба О.М., Алексеенко А.Н., Меринов А.В.

## Гидроксильированные полициклические ароматические углеводороды как биомаркёры воздействия на работников производства алюминия

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических ТСА», 665827, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Актуальность исследования обусловлена воздействием высокотоксичных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на работников алюминиевого производства и необходимостью определения релевантных биомаркёров экспозиции для оценки риска нарушения их здоровья.

**Материалы и методы.** С помощью авторского метода ГХ-МС выполнены исследования содержания 7 гидроксильированных метаболитов ПАУ (ОН-ПАУ) в моче 130 работников цехов с традиционной (ТСА) и модернизированной (ТОА) технологиями производства алюминия и 22 человек контрольной группы.

**Результаты.** Выявлены высокие уровни ОН-ПАУ в моче работников цехов с ТСА и ТОА, превышающие значения контрольной группы в 1,7–120,7 и 1,2–12,4 раза соответственно, и предел биологического индекса экспозиции – в 2–28 и 1,2–2,9 раза соответственно. Установлены тесные корреляционные связи между содержанием нормируемого маркерного метаболита ПАУ – 1-ОHPyr и уровнями доминирующих в моче у работников цехов с ТСА и ТОА 2-OHFlе ( $r = 0,860$  и  $0,869$ ), 3-ОHPhe ( $r = 0,902$  и  $0,932$ ) и 2-OHNap ( $r = 0,433$  и  $0,412$ ).

**Ограничения исследования.** Одним из потенциальных ограничений данного исследования стала сложность определения содержания в моче работников гидроксильированных метаболитов высокомолекулярных (5,6-ядерных) ПАУ, которые преимущественно удаляются с фекальными выделениями. **Заключение.** Результаты проведенных исследований продемонстрировали, что 2-OHNap, 2-OHFlе и 3-ОHPhe могут быть применимы в качестве приоритетных биомаркёров воздействия общих ПАУ с целью оценки риска для здоровья работников в дополнение к общепринятому маркерному метаболиту 1-ОHPyr.

**Ключевые слова:** производство алюминия; полициклические ароматические углеводороды; гидроксильированные метаболиты; работники; биологический мониторинг

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение ЛЭК № 2 от 18.02.2020 г.), выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (ред. 2013 г.), не ущемляло прав и не подвергало опасности благополучие субъектов исследования, проведено с их согласия.

**Для цитирования:** Шаяхметов С.Ф., Журба О.М., Алексеенко А.Н., Меринов А.В. Гидроксильированные полициклические ароматические углеводороды как биомаркёры воздействия на работников производства алюминия. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1005–1010. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1005-1010> <https://elibrary.ru/dbisxj>

**Для корреспонденции:** Шаяхметов Салим Файзыевич, e-mail: salimf53@mail.ru

**Вклад авторов:** Шаяхметов С.Ф. – концепция и дизайн исследования, поиск источников литературы, написание текста; Журба О.М. – концепция и дизайн исследования, поиск источников литературы, сбор материала; Алексеенко А.Н. – лабораторные исследования; Меринов А.В. – сбор данных литературы, сбор материала, статистическая обработка. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование проведено в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Поступила: 14.04.2026 / Поступила после доработки: 04.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликована: 20.10.2026

Salim F. Shayakhmetov, Olga M. Zhurba, Anton N. Alekseenko, Alexey V. Merinov

## Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in workers of aluminum production

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The relevance of the study is due to the impact of highly toxic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on workers of aluminum production and the need of identification of relevant exposure biomarkers to assess the risk of damage to their health.

**Materials and methods.** The content of seven hydroxylated metabolites of PAHs (OH-PAH) in the urine in one hundred thirty workers from workshops with traditional (TSA) and modernized (TOA) technologies for aluminum production and 22 persons in the control group were studied using the author's GC-MS method.

**Results.** High levels of OH-PAH were found in the urine in workers in workshops with TSA and TOA, exceeding the values of the control group by 1.7–120.7 and 1.2–12.4 times, respectively, and the limit of the biological exposure index by 2.0–28.0 and 1.2–2.9 times. Close correlations were established between the content of the standardized marker metabolite of PAHs, 1-OHPyr, and the levels of 2-OHFlе ( $r = 0.860$  and  $0.869$ ), 3-OHPhe ( $r = 0.902$  and  $0.932$ ), and 2-OHNap ( $r = 0.433$  and  $0.412$ ) dominant in the urine in workers in workshops with TSA and TOA.

**Limitations.** One potential limitation of this study is the difficulty in determining the levels of hydroxylated metabolites of high molecular weight (5,6-nuclear) PAHs in the urine in workers, which are primarily eliminated with fecal excretion.

**Conclusion.** The results of the conducted studies demonstrated that 2-OHNap, 2-OHFlе and 3-OHPhe can be used as priority biomarkers of exposure to total PAHs for assessing the health risk of workers in addition to the generally accepted marker metabolite 1-OHPyr.

**Keywords:** aluminum production; polycyclic aromatic hydrocarbons; hydroxylated metabolites; workers; biological monitoring

**Compliance with ethical standards.** The study was approved by the Local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution ESIMER and was conducted in accordance with the ethical principles of research set out in the Helsinki declaration of the World Medical Association (2013 edition).

**For citation:** Shayakhmetov S.F., Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Merinov A.V. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in workers of aluminum production. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1005–1010. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1005-1010> <https://elibrary.ru/dbisxj> (In Russ.)

**For correspondence:** Salim F. Shayakhmetov, e-mail: salimf53@mail.ru

**Contribution:** Shayakhmetov S.F. – concept and design of the study, organization of the study, search for literature sources, writing the text; Zhurba O.M. – concept and design of the study, search for literature sources, search for literature sources, collection of material; Alekseenko A.N. – laboratory research; Merinov A.V. – collection of literature data, collection of material, statistical processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The work was performed within the framework of funds allocated for the implementation of the state task by East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Received: April 14, 2026 / Revised: June 4, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) являются одними из токсических органических веществ бензольного ряда, в химической структуре которых присутствуют два бензольных конденсированных кольца и более. В России и зарубежных странах 16 соединений ПАУ включены в список приоритетных загрязнителей. ПАУ принято делить на лёгкие (летучие) 2–4-ядерные низко- и среднемолекулярные (нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен) и тяжёлые 5–6-ядерные высокомолекулярные (бензо[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а,h]антрацен, бензо[g,h,i]перилен и индено(1,2,3-c,d)пирен) структуры [1, 2].

Полиарены наряду с высокой токсичностью и способностью накапливаться в объектах окружающей среды и организме человека характеризуются высокими токсическими, канцерогенными и мутагенными свойствами [3–5]. Профессиональная деятельность на производствах коксохимии, металлургии (алюминий, железо, сталь), битума, при проведении асфальтовых работ сопряжена с повышенным воздействием ПАУ. На работников данных производств влияет многокомпонентная смесь полиаренов, которые вызывают различные нарушения здоровья, в том числе злокачественные новообразования кожи, лёгких, мочеполовых органов [6–8].

Из-за высокой опасности ПАУ в России и других странах проводится контроль содержания в производственной и окружающей среде наиболее опасного из соединений полиаренов — бенз(а)пирена, а также некоторых других ПАУ [9]. При этом используемый в некоторых зарубежных странах альтернативный способ объективной персонализированной оценки воздействия полиаренов на человека путём определения их гидроксированных метаболитов (ОН-РАН) в моче может служить более точной мерой полученной внутренней дозы ПАУ [10–12].

Для биологического мониторинга Американской ассоциацией государственных промышленных гигиенистов (ACGIH) было предложено количественное определение принятого в качестве биомаркера экспозиции ПАУ метаболита пирена 1-гидроксипирена (1-ОНПуг) в моче, для которого установлено предельное значение биологического индекса экспозиции (BEI) 2,5 мкг/л [13]. Основной недостаток этого подхода — то, что сам по себе пирен не является канцерогенным, а количественное определение 1-ОНПуг позволяет проводить только общую оценку риска опасности экспозиции всей смеси компонентов ПАУ на организм [14].

В настоящее время ACGIH и многие исследователи указывают на необходимость изучения особенностей содержания максимально большого количества ОН-РАН в моче работников вредных производств. ОН-РАН могут стать новыми специфическими биомаркерами экспозиции разных соединений полиаренов для объективной персонализированной оценки риска нарушения здоровья [13–16]. Ранее такие исследования были проведены среди работников коксохимического производства, а также занятых укладкой и покрытием дорог горячим асфальтом, тушением лесных пожаров [14, 17, 18]. Однако изучению и сравнительному анализу содержания и распределения широкого спектра ОН-РАН в моче работников алюминиевого производства не уделялось должного внимания, и единичные исследования касались только определения содержания 1-ОНПуг [11, 15, 19].

*Цель исследования* — сравнительная оценка уровней содержания и распределения различных моногидроксированных метаболитов ПАУ в моче экспонированных работников электролизных цехов при разных технологиях алюминиевого производства.

## Материалы и методы

Объектом исследования была биологическая среда (моча) работников электролизных цехов крупнейшего алюминиевого производства Восточной Сибири, входящего

в список общепризнанных канцерогеноопасных производств. Электролизное производство алюминия осуществляется в электролизёрах с применением традиционной технологии самообжигающихся (ТСА) и модернизированной технологии предварительно обожжённых анодов (ТОА).

В когортном исследовании приняли участие работники основных профессий исследуемых цехов, занятые обслуживанием электролизёров, анодов и грузоподъёмных мостовых кранов, а также лица, не работающие на данном производстве и не подвергающиеся воздействию ПАУ. Общее число участников когорты — 152. Основными профессиональными группами работников цехов с ТСА ( $n = 100$ ) были анодчики, электролизники и машинисты кранов, а цехов с ТОА ( $n = 30$ ) — операторы-рамщики, электролизники и крановщики. Контрольную группу составили 22 человека, не подвергавшиеся воздействию ПАУ на производстве.

Сбор образцов мочи для анализа содержания ОН-РАН осуществляли в специальные пропиленовые контейнеры во время медицинского обследования работников в поликлинике завода. Пробы мочи после сбора кодировали, доставляли в лабораторию, замораживали и хранили при температуре минус 20 °С до проведения анализа. В качестве биомаркёров воздействия ПАУ определяли 7 гидроксированных низко- и среднемолекулярных полиаренов, выделяемых из организма преимущественно с мочой: 2-гидросинафталин (2-ОНNap), 2-гидроксифлуорен (2-ОНFle), 2-гидроксифенантрен (2-ОНPhe), 3-гидроксифенантрен (3-ОНPhe), 9-гидроксифенантрен (9-ОНPhe), 1-гидроксипирен (1-ОНPug) и 6-гидроксихризен (6-ОНChr). Полученные результаты определения 1-ОНПуг в моче сопоставляли с допустимым показателем BEI (ACGIH) 2,5 мкг/л [13].

Определение ОН-РАН и количественно-качественный анализ их содержания в моче осуществляли с помощью разработанной нами высокочувствительной методики хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на газовом хроматографе Agilent 7890 с масс-селективным детектором Agilent 5975. Пробоподготовка основана на дисперсионной жидкостной микроэкстракции трихлорметаном в кислой среде. Дериватизация осуществлялась в разогретом порту инжектора реагентом N,O-бистриметилсилилтрифторацемидом. В качестве диспергирующего растворителя использовали этанол. ГХ-МС анализ проводился в следующих условиях: pH = 1,6, объём этанола 300 мкл, время экстракции 25 с на высокотемпературной колонке НТ-8 в режиме температурного градиента в течение 15 мин. Линейный диапазон концентраций соответствовал 0,5–100 нг/мл. Подробная информация о методе анализа ОН-РАН и характеристиках масс-спектров была представлена в предыдущей публикации [20].

Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение ЛЭК № 2 от 18.02.2020 г.), выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека», не ущемляло прав и не подвергало опасности благополучие субъектов исследования, проведено с их согласия.

Для статистической обработки результатов исследований использовали пакет статистических программ Jamovi (version 2.3.2). В связи с отсутствием нормального распределения данных о содержании ОН-РАН в моче работников в качестве описательных статистик использовали медиану и значения межквартильного интервала. Сравнение количественных показателей осуществляли с использованием непараметрических критериев Краскала — Уоллиса и Манна — Уитни с поправкой Бонферрони. Корреляционный анализ проводили с применением коэффициента корреляции Спирмена. Результаты статистического анализа считали достоверными при  $p < 0,05$ .

## Результаты

Для оценки экспозиции ПАУ и рисков, связанных с уровнями ОН-РАН, у работников производства алюминия был проведён сравнительный анализ количественного

**Содержание гидроксированных метаболитов ПАУ (мкг/л) в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА, *Me* (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**  
**Content PAHs hydroxylated metabolites (μg/L) in urine in workers in electrolysis shops with TSA and TOA, *Me* (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

| Тип технологии, профессия<br>Type of technology, occupation | 2-OHNaP            | 2-OHFle              | 2-OHPhe             | 3-OHPhe             | 9-OHPhe             | 1-OHPyr              | 6-OHChr             | ΣОН-ПАУ<br>ΣОН-PAH        |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| ТСА (все работники)<br>TSA (all workers)<br><i>n</i> = 100  | 10.0<br>(4.4–18.1) | 10.1<br>(4.8–30.7)   | 3.6<br>(1.3–10.7)   | 4.4<br>(2.1–19.6)   | 0.99<br>(0.41–2.5)  | 8.9<br>(2.7–34.9)    | 0.19<br>(0.06–0.50) | 45.88<br>(23.43–107.95)   |
| Электролизники<br>Electrolyzers<br><i>n</i> = 43            | 8.8<br>(4.0–16.6)  | 5.9<br>(3.8–10.6)    | 1.6<br>(0.90–3.5)   | 2.8<br>(1.8–4.6)    | 0.84<br>(0.37–1.4)  | 5.1<br>(2.2–10.5)    | 0.13<br>(0.06–0.44) | 26.34<br>(18.40–46.80)    |
| Анодчики<br>Anode workers<br><i>n</i> = 25                  | 13.3<br>(8.0–18.1) | 75.8<br>(29.9–112.3) | 14.8<br>(10.6–29.5) | 33.7<br>(21.2–84.0) | 0.84<br>(0.41–4.0)  | 70.0<br>(34.1–144.9) | 0.29<br>(0.06–0.78) | 256.21<br>(107.18–419.30) |
| Машинисты крана<br>Crane operators<br><i>n</i> = 32         | 7.6<br>(3.7–17.7)  | 11.2<br>(5.3–15.8)   | 4.1<br>(1.8–5.9)    | 5.1<br>(2.3–9.8)    | 1.4<br>(0.64–3.1)   | 6.4<br>(2.9–21.4)    | 0.14<br>(0.06–0.41) | 49.31<br>(24.46–70.53)    |
| ТОА (все работники)<br>TOA (all workers)<br><i>n</i> = 30   | 5.3<br>(2.9–21.1)  | 3.9<br>(2.6–8.2)     | 1.4<br>(0.81–2.6)   | 2.3<br>(1.3–4.8)    | 1.6<br>(1.1–2.7)    | 3.6<br>(2.0–8.0)     | 0.06<br>(0.06–0.18) | 24.25<br>(14.56–47.84)    |
| Электролизники<br>Electrolyzers<br><i>n</i> = 17            | 4.6<br>(2.7–22.6)  | 3.9<br>(3.5–6.3)     | 1.8<br>(1.1–2.5)    | 2.3<br>(1.3–4.6)    | 1.7<br>(1.1–2.5)    | 3.8<br>(2.1–8.1)     | 0.06<br>(0.06–0.16) | 22.36<br>(14.42–39.66)    |
| Рамщики<br>Framers<br><i>n</i> = 6                          | 8.4<br>(3.0–14.7)  | 2.6<br>(1.7–4.9)     | 0.63<br>(0.51–1.1)  | 1.3<br>(0.83–3.6)   | 1.1<br>(0.70–1.5)   | 2.9<br>(1.6–5.2)     | 0.20<br>(0.09–0.25) | 20.15<br>(11.83–35.82)    |
| Крановщики<br>Crane operators<br><i>n</i> = 7               | 14.0<br>(4.8–23.2) | 5.8<br>(2.8–10.1)    | 1.1<br>(1.1–3.9)    | 2.3<br>(1.8–5.7)    | 2.8<br>(1.4–5.4)    | 7.2<br>(2.4–8.0)     | 0.06<br>(0.06–0.06) | 39.66<br>(21.31–66.17)    |
| Контрольная группа<br>Control group<br><i>n</i> = 22        | 4.5<br>(2.5–6.3)   | 0.95<br>(0.78–1.2)   | 0.26<br>(0.19–0.35) | 0.56<br>(0.44–0.88) | 0.32<br>(0.11–0.54) | 0.58<br>(0.35–0.88)  | 0.40<br>(0.36–0.51) | 8.15<br>(6.71–10.94)      |

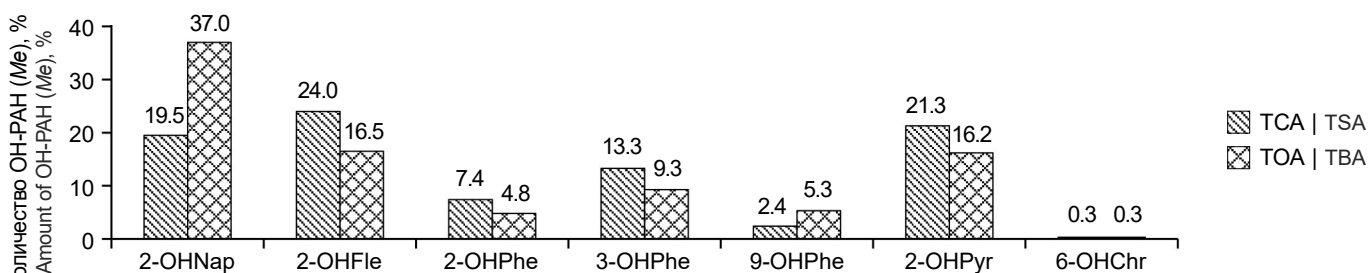
содержания и долевого соотношения различных ОН-РАН в моче рабочих основных профессий электролизных цехов и лиц контрольной группы (см. **таблицу**).

ГХ-МС анализ содержания ОН-РАН в моче работников электролизных цехов показал, что из исследуемых аналитов 2-ОНNaP, 2-ОНFle, 2-ОНPhe, 3-ОНPhe и 1-ОНPyr были обнаружены в 100% образцов мочи, за исключением 9-ОНPhe и 6-ОНChr, которые определялись в 92 и 56% проб соответственно. При этом концентрации ОН-РАН в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА варьировали в различном диапазоне величин и имели неоднородный характер распределения.

В целом медианные концентрации ΣОН-РАН и индивидуальных ОН-РАН (за исключением 6-ОНChr) в моче обследованных профессиональных групп работников цехов с ТСА достоверно превышали значения контрольной группы в 3,2–31,4 и 1,7–120,7 раза, а у работников цехов с ТОА (кроме электролизников) – в 2,5–4,9 и 1,2–12,4 раза соответственно ( $p < 0,05$ ). Самые высокие уровни содержания ОН-РАН в моче всей когорты работников электролизных цехов с ТСА и ТОА отмечались у 2-ОНNaP, 2-ОНFle и 1-ОНPyr, самые низкие – 6-ОНChr.

В цехах с традиционной ТСА концентрации 2-ОНFle, 2-ОНPhe, 3-ОНPhe, 1-ОНPyr и ΣОН-РАН в моче анодчиков были значительно выше, чем аналогичные показатели электролизников и машинистов кранов ( $p < 0,017$ ). При этом наибольшие уровни содержания 1-ОНPyr в моче, превышавшие допустимую величину ВЕИ (2,5 мкг/л), отмечались у анодчиков (в 28 раз), в меньшей степени – у машинистов кранов (в 2,6 раза) и электролизников (в 2 раза).

В цехах, применяющих ТОА, медианные концентрации индивидуальных ОН-РАН и ΣОН-РАН в моче работников основных групп профессий достоверно не различались. При этом уровни содержания 1-ОНPyr в моче работников превышали предел ВЕИ в 1,2–2,9 раза, преимущественно у крановщиков. Также содержание 2-ОНFle, 2-ОНPhe, 3-ОНPhe, 1-ОНPyr и ΣОН-РАН в моче работников цехов с ТОА в целом было в 1,9–2,6 раза ниже, чем аналогичные показатели работников цехов с ТСА ( $p < 0,05$ ). Метаболические профили долевого соотношения индивидуальных ОН-РАН в пробах мочи у работников исследуемых электролизных цехов приведены на **рисунке**.



Распределение группового состава гидроксированных метаболитов ПАУ в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА.

Distribution of the group composition of PAHs hydroxylated metabolites in urine in workers in electrolysis shops with TSA and TOA.

Среди исследованных ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА 2-ОНFle (24%), 1-ОНРуг (21,3%), 2-ОНNap (19,5%) и 3-ОНPhe (13,3%) составляющие 78,1% суммы ОН-РАН были наиболее распространёнными аналитами, за ним следовали 2- и 9-гидроксифенантрены (7,4 и 2,4% соответственно) и 6-ОНChr (0,3%). В то же время в моче работников цехов с ТОА отмечался иной порядок распределения ОН-РАН: преобладали 2-ОНNap (37%), 2-ОНFle (16,5%) и 1-ОНРуг (16,2%). Доля других метаболитов была значительно меньше: 3-ОНPhe — 9,3%, 9-ОНPhe — 5,3%, 2-ОНPhe — 4,8%, 6-ОНChr — 0,3%.

## Обсуждение

В настоящее время особую актуальность приобретают оценка реальных уровней экспозиции полиаренов и анализ рисков для здоровья работников современных алюминиевых производств. В мировой практике повышенные уровни содержания маркерных токсикантов в объектах окружающей среды и биосубстратах человека рассматриваются как серьёзные доказательные аргументы их негативного воздействия на здоровье. Угрозу здоровью представляют не только сами ПАУ, но и продукты их метаболизма, зачастую более опасные, чем исходные соединения [9, 21, 22].

Проведённые нами ранее исследования [7] показали, что наиболее высокие концентрации индивидуальных соединений и суммы 13 идентифицированных ПАУ отмечались в цехах, использующих ТСА, особенно в рабочей зоне анодчиков. Более низкие значения ПАУ (в 2–93 раза) зарегистрированы в цехах с ТОА. В целом суммарная токсичность обнаруженных ПАУ, выраженных через Б(а)П — эквивалентные коэффициенты, превышала ПДК Б(а)П в 1,8–7,3 раза. При этом доля вклада отдельных соединений в суммарную степень опасности ПАУ варьировала от 17,6 до 80,3%, что свидетельствует о необходимости оценки содержания в воздухе всей смеси ПАУ и выявление в моче работников приоритетных ОН-РАН.

Результаты настоящего исследования продемонстрировали статистически значимые различия медианных концентраций отдельных ОН-РАН и  $\Sigma$ ОН-РАН в моче как между исследуемыми цехами, профессиональными группами, так и по сравнению с контрольной группой и допустимой величиной ВЕИ для 1-ОНРуг. Так, у работников цехов с ТСА и ТОА медианные концентрации  $\Sigma$ ОН-РАН и отдельных метаболитов, особенно 2-ОНNap, 2-ОНFle, 1-ОНРуг и 3-ОНPhe, в моче были в 1,7–120,7 раза выше, чем в контрольной группе. При этом уровни содержания регламентированного АСГН 1-ОНРуг в моче работников цехов с ТСА (электролизников, анодчиков и машинистов кранов) превышали значение ВЕИ в 2–28 раз. Более того, самые высокие концентрации ОН-РАН в моче, превышающие значения контрольной группы и ВЕИ, отмечались у анодчиков по сравнению с электролизниками и машинистами кранов, что свидетельствует о высоком уровне химической нагрузки ПАУ и риске нарушения здоровья у анодчиков.

Важно, что в цехах с ТОА существенных различий содержания приоритетных ОН-РАН в моче между основными группами профессий не наблюдалось. Тем не менее уровни содержания 1-ОНРуг в моче работников были выше предела ВЕИ в 1,2–2,9 раза, особенно у крановщиков, рабочее место которых расположено в верхней зоне цеха, что может указывать на накопление метаболита в организме и повышенный риск для здоровья работающих. При этом концентрации обнаруженных ОН-РАН в моче работников цехов с модернизированной ТОА оказались в 1,9–2,6 раза ниже, чем аналогичный показатель у рабочих цехов с традиционной ТСА. По данным Тушек М. и соавт., концентрация 1-ОНРуг в моче на уровне 4,4 мкг/г креатинина (примерно 3,4 мкг/л) может быть связана с относительным риском возникновения рака лёгких примерно на уровне 1,3, а уровни свыше 7,7 мкг/г креатинина (около 6 мкг/л) рассматриваются как повышенный риск карциномы лёгких у работников

[23]. При этом степень негативного влияния полициклических ароматических углеводородов на организм во многом определяется их химической структурой и токсикологическими характеристиками ОН-РАН. Поступая в организм, соединения ПАУ подвергаются метаболизму с образованием гидроксильрованных производных, способных связываться с ДНК и запускать канцерогенный процесс [3].

Сравнение полученных результатов с данными зарубежной литературы показало, что уровни содержания 2-ОНFle, 2-, 3-ОНPhe и 1-ОНРуг в моче анодчиков цехов с ТСА были в 2,7–70 раз выше, чем показатель у работников коксохимического производства (27,6; 3,7; 5,7; 15,4 мкг/л соответственно), лесных пожарных (2,3; 0,5; 1,1; 0,9 мкг/л) и асфальтировщиков дорог (1-ОНРуг 0,26–1,4 мкг/л). При этом у электролизников и машинистов кранов цехов с ТСА и у всех профессиональных групп работников цехов с ТОА значения ОН-РАН были ниже, чем у рабочих коксохимического завода, но выше уровней ОН-РАН у лесных пожарных и асфальтировщиков дорог [14, 17, 18].

Известно, что одним из важных этапов биомониторинга ПАУ является оценка процентных соотношений и корреляционных связей между уровнями экскретируемых с мочой ОН-РАН. Такой анализ позволяет выяснить метаболический профиль и выявить релевантные биомаркеры экспозиции ПАУ у работников вредных производств [14]. Анализ расчётов процентных соотношений содержания разных групп ОН-РАН в моче у работников цехов с ТСА и ТОА выявил общее преобладание 2-ОНNap, 2-ОНFle, 1-ОНРуг и 3-ОНPhe, составляющее соответственно 78,1 и 78,9% от  $\Sigma$ ОН-РАН. Ранговый порядок долевого распределения ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА имел следующую последовательность: 2-ОНFle (24% от  $\Sigma$  7 ОН-РАН) > 1-ОНРуг (21,3%) > 2-ОНNap (19,5%) > 3-ОНPhe (13,3%) > 2-ОНPhe (7,4%) > 9-ОНPhe (2,4%) > 6-ОНChr (0,3%). У работников цехов с ТОА ранговый порядок долевого распределения имел вид: 2-ОНNap (37%) > 2-ОНFle (16,5%) > 1-ОНРуг (16,2%) > 3-ОНPhe (9,3%) > 9-ОНPhe (5,3%) > 2-ОНPhe (4,8%) > 6-ОНChr (0,3%). Выявленные различия в распределении ОН-РАН, вероятно, были обусловлены разными технологиями электролиза алюминия, уровнями содержания в воздухе цехов соединений ПАУ и их качественным составом, связанными с этим метаболическими и кинетическими процессами экскреции из организма.

Корреляционный анализ взаимосвязи между содержанием ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА и ТОА продемонстрировал высокую степень корреляции между концентрациями регламентированного маркера экспозиции ПАУ 1-ОНРуг и уровнями 2-ОНFle ( $r = 0,86$  и  $0,869$  соответственно), 2-ОНPhe ( $r = 0,884$  и  $0,848$ ) и 3-ОНPhe ( $r = 0,902$  и  $0,932$ ), а также умеренную и слабые связи между уровнями 1-ОНРуг и концентрациями 2-ОНNap ( $r = 0,433$  и  $0,412$ ), 9-ОНPhe ( $r = 0,254$  и  $0,426$ ) и 6-ОНChr ( $r = 0,292$ ). Также отмечалась высокая степень корреляции между уровнями 2-ОНFle и 2-ОНPhe ( $r = 0,891$  и  $0,813$ ), 3-ОНPhe ( $r = 0,886$  и  $0,841$ ), между содержанием 2-ОНPhe и 3-ОНPhe ( $r = 0,945$  и  $0,898$ ) в моче обследованных, что указывает на действие единого источника (фактора) загрязнения воздуха рабочей зоны. В целом порядок расположения исследуемых ОН-РАН в зависимости от тесноты (силы) их корреляции с нормируемым 1-ОНРуг был следующим: высокая — 2-ОНFle; 2-ОНPhe; 3-ОНPhe > умеренная — 2-ОНNap > слабая — 9-ОНPhe; 6-ОНChr. Интерпретация данных анализа количественного распределения и ассоциаций между концентрациями ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА и ТОА показывает, что 2-ОНNap, 2-ОНFle и 3-ОНPhe могут быть применены в качестве приоритетных биомаркеров воздействия общих ПАУ в дополнение к общепризнанному маркерному метаболиту 1-ОНРуг. Использование только 1-ОНРуг для оценки риска опасности экспозиции ПАУ может приводить к потере информации о характере и степени негативного воздействия широкого спектра полиаренов.

**Ограничения исследования.** Одно из потенциальных ограничений этого исследования — сложность определения содержания в моче работников гидроксилированных метаболитов высокомолекулярных (5,6-ядерных) ПАУ, которые преимущественно удалялись с фекальными выделениями. Необходимы дальнейшие исследования неметаболизированных лёгких (2–3-ядерных) и тяжёлых (5–6-ядерных) соединений ПАУ в крови и моче работников.

## Заключение

Результаты проведённых исследований продемонстрировали высокие уровни содержания индивидуальных ОН-РАН и суммы ОН-РАН (включая маркерный 1-ОНРуг) в моче работников алюминиевого производства, превышавшие в 1,7–120,7 раза значения контрольной группы и в 1,2–28 раз — предел ВЕИ для 1-ОНРуг. Такой результат может свидетельствовать о серьёзной угрозе здоровью работников. Самые высокие медианные концентрации ОН-РАН в моче и связанные с ними риски для здоровья наблюдались у работников, особенно анодчиков, цехов с ТСА, более низ-

кие (в 1,9–2,6 раза) — у работников цехов с ТОА. Разница была обусловлена применяемой технологией производства алюминия, уровнями экспозиции ПАУ и профессией работников. В групповом составе измеренных ОН-РАН в моче работников данных цехов отмечено преобладание 2-ОННар, 2-ОНФле, 1-ОНРуг и 3-ОНРфе (78,1 и 78,9% от ΣОН-РАН). Установлены тесные корреляционные связи между содержанием нормируемого маркерного метаболита ПАУ — 1-ОНРуг и уровнями доминирующих 2-ОНФле ( $r = 0,86$  и  $0,869$ ), 3-ОНРфе ( $r = 0,902$  и  $0,932$ ) и 2-ОННар ( $r = 0,433$  и  $0,412$ ) в моче работников цехов с ТСА и ТОА. Полученные данные свидетельствуют о том, что 2-ОННар, 2-ОНФле и 3-ОНРфе в моче могут быть применены в качестве приоритетных биомаркеров воздействия общих ПАУ при оценке риска для здоровья работников производства алюминия в дополнение к общепризнанному нормированному АСГИН маркерному метаболиту ПАУ — 1-ОНРуг. Одновременное определение в моче уровней нескольких приоритетных биомаркеров экспозиции ПАУ позволит выявить характер воздействия смеси полиаренов и объективно оценить риски для здоровья работников.

## Литература

(п.п. 2–6, 8, 10–18, 23 см. References)

1. Смола В.И. ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. Часть 1. М.: Полиграф сервис; 2013.
7. Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Маринайте И.И., Меринов А.В. Содержание полиаренов в воздухе рабочей зоны производства алюминия. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(4): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nigvwd>
9. Плотникова О.А., Мельников Г.В., Тихомирова Е.И. Полициклические ароматические углеводороды: характеристики, источники, нормирование, спектроскопические методы определения (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2021; (4): 12–9. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019> <https://elibrary.ru/gyuujm>
19. Шаяхметов С.Ф., Алексеев А.Н., Меринов А.В., Журба О.М. Идентификация и характеристика содержания метаболита полициклических ароматических углеводородов 1-гидроксилирена в моче как маркера экспозиции работников электролизных цехов алюминиевого производства. *Анализ риска здоровью*. 2022; (3): 90–7. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.3.08> <https://elibrary.ru/wretzp>
20. Алексеев А.Н., Журба О.М., Меринов А.В., Шаяхметов С.Ф. Хромато-масс-спектрометрическое определение гидроксилированных полиароматических углеводородов в моче с помощью дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракции и дериватизации в порту инжектора. *Журнал аналитической химии*. 2024; 79(10): 1132–40. <https://elibrary.ru/teyde>
21. Шилов В.В., Маркова О.Л., Кузнецов А.В. Биомониторинг воздействия вредных химических веществ на основе современных биомаркеров. Обзор литературы. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(6): 591–6. <https://elibrary.ru/qlaqms>
22. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Чашин В.П., Гудков А.Б. Научные принципы применения биомаркеров в медико-экологических исследованиях (обзор литературы). *Экология человека*. 2019; (9): 4–14. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-9-4-14> <https://elibrary.ru/wswnqj>
1. Smola V.I. PAHs in the Environment: Problems and Solutions. Part 1 [PAU v okruzhayushchei srede: problemy i resheniya. Chast' 1]. Moscow: Poligraf servis; 2013. (in Russian)
2. McGowin A.E. Polycyclic aromatic hydrocarbons. In: *Chromatographic Analysis of the Environment*. 3rd edition. CRC Press; 2006: 555–616.
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Some Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures*. Lyon; 2010.
4. Ifegwu O.C., Anyakora C. Polycyclic aromatic hydrocarbons: Part I. Exposure. *Adv. Clin. Chem.* 2015; 72: 277–304. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2015.08.001> <https://elibrary.ru/ydvbgk>
5. Yang L., Zhang H., Zhang X., Xing W., Wang Y., Bai P., et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(4): 2177. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042177> <https://elibrary.ru/lvgibi>
6. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt. J. Pet.* 2016; 25(1): 107–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011> <https://elibrary.ru/yejddk>
7. Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Marinaite I.I., Merinov A.V. Content of polyarenes in the air of the working area at aluminum production. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 104(4): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nigvwd> (in Russian)
8. Zhao C., Guan X., Zhang Q., Meng L., Lin W., Yang R., et al. Parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in aluminum smelter workers: Serum levels, accumulation trends, and association with health indicators. *Sci. Total Environ.* 2024; 913: 169655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169655> <https://elibrary.ru/qitertd>
9. Plotnikova O.A., Melnikov G.V., Tikhomirova E.I. Polycyclic aromatic hydrocarbons: characteristics, sources, standardization, spectroscopic determination methods (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2021; (4): 12–9. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019> <https://elibrary.ru/gyuujm> (in Russian)
10. Jongeneelen F. Guidelines for biological monitoring of workers in aluminium production facilities for urinary 1-hydroxypyrene (1-pyrenol). *J. Environ. Monit.* 2004; 6(5): 61N–5N. <https://doi.org/10.1039/b312767m> <https://elibrary.ru/ebucaz>
11. Klöslöva Z., Drimal M., Balog K., Koppová K., Dubajová J. The relations between polycyclic aromatic hydrocarbons exposure and 1-OHP levels as a biomarker of the exposure. *Cent. Eur. J. Public Health*. 2016; 24(4): 302–7. <https://doi.org/10.21101/cejph.a4179>
12. Zhang Y., Ding J., Shen G., Zhong J., Wang C., Wei S., et al. Dietary and inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and urinary excretion of monohydroxy metabolites – a controlled case study in Beijing, China. *Environ. Pollut.* 2014; 184: 515–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.005>
13. 2020 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati; 2020.
14. Campo L., Rossella F., Pavanella S., Mielzynska D., Siwinska E., Kapka L., et al. Urinary profiles to assess polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in coke-oven workers. *Toxicol. Lett.* 2010; 192(1): 72–8. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2008.12.018>
15. Barbeau D., Persoons R., Marques M., Hervé C., Laffitte-Rigaud G., Maitre A. Relevance of urinary 3-hydroxybenzo(a)pyrene and 1-hydroxypyrene to assess exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures in metallurgy workers. *Ann. Occup. Hyg.* 2014; 58(5): 579–90. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu004>
16. Hadrup N., Mielżyńska-Svách D., Kozłowska A., Campisi M., Pavanella S., Vogel U. Association between a urinary biomarker for exposure to PAH and blood level of the acute phase protein serum amyloid A in coke oven workers. *Environ. Health.* 2019; 18(1): 81. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0523-1> <https://elibrary.ru/qsnuw>
17. Adetona O., Simpson C.D., Li Z., Sjödin A., Calafat A.M., Naeher L.P. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure to wood smoke in wildland firefighters. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2017; 27(1): 78–83. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.75>
18. Fostinelli J., Madeo E., Toraldo E., Sarnico M., Luzzana G., Tomasi C., et al. Environmental and biological monitoring of occupational exposure to polynuclear

- aromatic hydrocarbons during highway pavement construction in Italy. *Toxicol. Lett.* 2018, 298: 134–40. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.06.005>
19. Shayakhmetov S.F., Alekseenko A.N., Merinov A.V., Zhurba O.M. Identification and characterization of 1-hydroxypyrene contents in urine as a marker of exposure to PAH in workers of electrolysis workshops at aluminum production. *Health Risk Analysis*. 2022; (3): 90–7. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.3.08.eng> <https://elibrary.ru/paiyzt>
20. Alekseenko A.N., Zhurba O.M., Merinov A.V., Shayakhmetov S.F. Determination of hydroxylated polyaromatic hydrocarbons in urine by gas chromatography-mass spectrometry using dispersive liquid-liquid microextraction and injector-port derivatization. *J. Anal. Chem.* 2024; 79(10): 1491–9. <https://doi.org/10.1134/S1061934824700886> <https://elibrary.ru/nzlmji>
21. Shilov V.V., Markova O.L., Kuznetsov A.V. Biomonitoring of influence of harmful chemicals on the basis of the modern biomarkers. Literature review. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(6): 591–6. <https://elibrary.ru/qlaqms> (in Russian)
22. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Chashchin V.P., Gudkov A.B. Scientific principles of use of biomarkers in medico-ecological studies (review). *Ekologiya cheloveka*. 2019; (9): 4–14. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-9-4-14> <https://elibrary.ru/wswngj> (in Russian)
23. Tuček M., Bencko V., Volný J., Petanová J. A contribution to the health risk assessment of exposure to exhaust gases in custom officers at border crossing. *Čes. Prac. Lék.* 2006; 7(2): 76–83. (in Czech)

## Сведения об авторах

**Шаяхметов Салим Файзыевич**, доктор мед. наук, профессор, вед. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: salimf53@mail.ru

**Журба Ольга Михайловна**, доктор биол. наук, вед. науч. сотр., зав. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: zhurba99@gmail.com

**Алексеенко Антон Николаевич**, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alexeenko85@mail.ru

**Меринов Алексей Владимирович**, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alek-merinov@mail.ru

## About the authors

**Salim F. Shayakhmetov**, DSc (Medicine), professor, leading researcher of the Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8740-3133> E-mail: salimf53@mail.ru

**Olga M. Zhurba**, DSc (Biology), leading researcher, head, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9961-6408> E-mail: zhurba99@gmail.com

**Anton N. Alekseenko**, PhD (Chemistry), senior researcher, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4980-5304>, e-mail: alexeenko85@mail.ru

**Alexey V. Merinov**, PhD (Biology), researcher, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7848-6432> E-mail: alek-merinov@mail.ru



Зайцева Н.В., Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А.

## Особенности патогенетических механизмов развития негативных эффектов у детей в условиях аэрогенного воздействия металлов: количественная оценка причинно-следственных связей

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»  
Роспотребнадзор, 614045, Пермь, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Аэрогенное воздействие металлов, поступающих в организм из промышленных выбросов, является ведущим фактором формирования ассоциированной неинфекционной заболеваемости у детей. Цифровизация причинно-следственных связей с верификацией факта экспозиции на основе биомаркёров экспозиции и негативных эффектов повышает точность гигиенических оценок и эффективность профилактических мер.

**Цель исследования** — выявление особенностей патогенеза развития негативных эффектов у детей в условиях аэрогенного воздействия металлов на основе количественной оценки причинно-следственных связей (на примере оксидов марганца, меди, никеля, хрома и алюминия).

**Материалы и методы.** На основе углублённых медицинских обследований 2055 детей Красноярского края и Иркутской области (период 2016–2025 гг.) проведено каскадное регрессионное моделирование по детерминированной цепочке от внешней аэрогенной экспозиции до развития ассоциированных с ней патологий.

**Результаты.** Установлен вклад ингаляционного пути в формирование повышенных концентраций металлов в биосредах ( $R^2 = 0,23–0,7$ ), реализующийся на фоне сопутствующего поступления токсикантов другими путями. Определены реперные концентрации биомаркёров экспозиции ( $\text{мг/дм}^3$ ): в крови — хрома (0,0011), марганца (0,011), никеля (0,002) и меди (0,912), в моче — алюминия (0,0032). Обоснован профиль донозологических биомаркёров негативных эффектов: оксидативный стресс (рост гидроперекисей липидов и малонового диальдегида), митохондриальный апоптоз (экспрессия белка Bax), дисбаланс клеточного (повышение лимфоцитов  $\text{CD16}^+56^+$  и  $\text{CD19}^+$ ) и гуморального иммунитета (специфические к металлам иммуноглобулины), локальная эозинофилия. Выявлена дифференциация траекторий патогенеза у девочек и мальчиков.

**Ограничения исследования.** Ретроспективный анализ данных, диапазон уровней экспозиции, фокус на возрастной группе 4–7 лет, ингаляционный путь поступления металлов без учёта алиментарного и перкутанного путей.

**Заключение.** Количественные параметры причинно-следственных связей служат доказательной базой для верификации условий возникновения неинфекционных болезней при аэрогенном воздействии металлов. Учёт выявленных особенностей патогенеза и половых различий позволяет повысить эффективность программ профилактики для детей в условиях аэрогенного воздействия металлов.

**Ключевые слова:** металлы; аэрогенное воздействие; биомаркёры экспозиции; биомаркёры негативных эффектов; причинно-следственные связи; патогенетические механизмы

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике.

**Для цитирования:** Зайцева Н.В., Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А. Особенности патогенетических механизмов развития негативных эффектов у детей в условиях аэрогенного воздействия металлов: количественная оценка причинно-следственных связей. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1011–1019. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1011-1019> <https://elibrary.ru/esklrx>

**Для корреспонденции:** Кольдибекова Юлия Вячеславовна, e-mail: koldibekova@fcrisk.ru

**Вклад авторов:** Зайцева Н.В. — дизайн исследования, Кольдибекова Ю.В. — сбор и анализ литературных данных, написание текста; Землянова М.А. — редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 27.07.2026 / Поступила после доработки: 19.08.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Nina V. Zaitseva, Yuliya V. Koldibekova, Marina A. Zemlyanova

## Pathogenetic pathways of adverse health effects in children exposed to airborne metals: quantification of cause-effect relations

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm 614045, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Aerogenic exposure to metals coming from industrial emissions is a leading factor in the formation of associated non-infectious morbidity in children. Digitalization of cause-and-effect relationships with verification of the fact of exposure based on biomarkers of exposure and adverse effects increases the accuracy of hygienic assessments and the effectiveness of preventive measures.

**The aim of this study** was to identify peculiarities of pathogenetic pathways responsible for adverse health effects in children exposed to airborne metals based on quantification of cause-effect relations (exemplified by manganese, copper, nickel, chromium, and aluminum oxides).

**Materials and methods.** Based on in-depth medical studies of two thousand fifty five children in the Krasnoyarsk Territory and Irkutsk Region, for 2016–2025, cascade regression modeling was carried out along a deterministic chain from external aerogenic exposure to the development of associated diseases.

**Results.** The contribution of the inhalation route to the formation of increased concentrations of metals in biological media ( $R^2 = 0.23–0.70$ ), which occurs against the background of the concomitant intake of toxicants through other routes, has been established. Reference concentrations of exposure biomarkers ( $\text{mg/dm}^3$ ) were determined in the blood: chromium (0.0011), manganese (0.011), nickel (0.002) and copper (0.912), in the urine: aluminum (0.0032). The profile of prenosological biomarkers of adverse effects is substantiated: oxidative stress (increase in lipid hydroperoxides and malondialdehyde), mitochondrial apoptosis (expression of the Bax protein), imbalance of cellular (increase in  $\text{CD16}^+56^+$  and  $\text{CD19}^+$  lymphocytes) and humoral immunity (metal-specific immunoglobulins), local eosinophilia. Differentiation of pathogenesis trajectories in girls and boys was revealed.

**Limitations.** Retrospective data analysis, range of exposure levels, focus on the age group of 4–7 years, inhalation route of entry of metals without taking into account the nutritional and percutaneous routes.

**Conclusion.** Quantitative parameters of cause-and-effect relationships serve as an evidence base for verifying the conditions for the occurrence of non-infectious diseases under aerogenic exposure to metals. Taking into account the identified features of pathogenesis and gender differences makes it possible to increase the effectiveness of prevention programs for children under conditions of aerogenic exposure to metals.

**Keywords:** metals; airborne exposure; biomarkers of exposure; biomarkers of adverse effects; cause-effect relations; pathogenetic pathways

**Compliance with ethical standards.** The study did not require approved by an ethics committee.

**For citation:** Zaitseva N.V., Koldibekova Yu.V., Zemlyanova M.A. Pathogenetic pathways of adverse health effects in children exposed to airborne metals: quantification of cause-effect relations. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1011–1019. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1011-1019> <https://elibrary.ru/esklrx> (In Russ.)

**For correspondence:** Yuliya V. Koldibekova, e-mail: koldibekova@fcrisk.ru

**Contributions:** Zaitseva N.V. — study design; Koldibekova Yu.V. — Data collection and literature analysis, wiring the text; Zemlyanova M.A. — editing the text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: July 27, 2026 / Revised: August 19, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Аэрогенное воздействие химических веществ, содержащихся в промышленных выбросах, является ведущим фактором формирования ассоциированной неинфекционной заболеваемости у детей [1, 2]. Минимальная толщина аэрогенного барьера и значительная площадь контакта в лёгочной паренхиме детей обеспечивают мгновенную диффузию газов и мелкодисперсных аэрозолей в альвеолярной зоне респираторного тракта [3]. Интенсивная транслокация поллютантов в системный кровоток в обход первичного метаболизма в печени определяет по сравнению с пероральным поступлением специфику токсикокинетики и обуславливает высокие пиковые концентрации веществ в биологических средах [4].

Особую опасность представляют металлургические и алюминиевые выбросы токсичных металлов (например, марганца, хрома, никеля, меди и алюминия). Исследования подтверждают достоверную связь между экспозицией оксидами металлов и многими респираторными, неврологическими и эндокринными нарушениями [5, 6]. Современный гигиенический анализ требует цифровизации причинно-следственных связей для точной верификации аэрогенной экспозиции и её негативных эффектов. В мировой практике биомаркерами экспозиции традиционно служат концентрации химических веществ в биологических средах (прежде всего в цельной крови и моче [7, 8]) — показателем, недостаточно адаптированные для детей 4–7 лет. При этом реперные уровни и ассоциированные с ними негативные эффекты практически не определены. Данная возрастная группа наиболее уязвима из-за высокой минутной вентиляции лёгких на единицу массы тела и незрелости биологических барьеров. При этом важным аспектом является анализ половых различий в детской популяции, предопределяющих разную степень восприимчивости к токсикантам [9].

Цель настоящего исследования — выявление особенностей патогенетических механизмов развития негативных эффектов у детей в условиях аэрогенного воздействия металлов (на примере оксидов марганца, меди, никеля, хрома и алюминия) на основе количественной оценки причинно-следственных связей.

Оцифрованные причинно-следственные связи необходимы для выявления этиологии неинфекционных болезней при аэрогенном воздействии химических веществ. Полученные результаты востребованы в санитарно-эпидемиологических оценках для предотвращения вредного влияния на человека химического фактора среды обитания. Выявление особенностей патогенеза позволяет повысить адресность индивидуальной и групповой профилактики с учётом половых различий.

## Материалы и методы

Применён метод каскадного моделирования для количественного описания детерминированной цепочки: «концентрация металла в атмосферном воздухе — ингаляционная доза — концентрация в биосреде — донозологическое

отклонение или состоявшаяся патология». Транзиторный переход экспозиции из внешней среды в организм рассчитан поэтапно. На первом этапе выполнен расчёт экспозиционной дозы в соответствии с Руководством по оценке риска<sup>1</sup> для количественной характеристики аэрогенной нагрузки на организм детей. Второй этап предусматривал оцифровку зависимостей «экспозиционная доза — концентрация вещества в биосреде (кровь, моча)» для математического доказательства связи и обоснования биомаркёров экспозиции. На третьем этапе фокус исследования смещён в сторону верификации негативных эффектов на повышенное содержание биомаркёров экспозиции в биосредах путём анализа донозологических отклонений биохимических, иммунологических показателей от физиологической нормы и вероятность развития клинических форм болезней (в соответствии с МКБ-10). Построенные модели «биомаркёр экспозиции — биомаркёр негативного эффекта» замкнули сквозную детерминированную цепочку и позволили количественно установить реперные уровни металлов в биосредах, инициирующие развитие негативных эффектов у детей. За реперную концентрацию принимали расчётный уровень металла в крови или моче, соответствующий верхней 95%-й доверительной границе модели отношения шансов (OR), равного 1, при котором отклонение маркёра эффекта от нормы в группе наблюдения относительно группы сравнения статистически значимо ( $p \leq 0,05$ )<sup>1,2</sup>.

Для выявления и количественного анализа причинно-следственных связей использована деперсонифицированная база данных, включающая индивидуальные результаты углублённых медицинских обследований<sup>3</sup> 2055 детей в возрасте 4–7 лет (период 2016–2025 гг.). Формирование базы данных осуществлялось на основе результатов сплошного поперечного обследования детей, посещающих дошкольные образовательные организации (детские сады) исследуемых территорий. В анализируемые группы вошли дети, проживающие в зонах высокой аэрогенной нагрузки оксидами приоритетных металлов вследствие влияния выбросов крупных промышленных предприятий на пяти репрезентативных территориях Красноярского края и Иркутской области. Структура исследуемых групп представлена в табл. 1.

<sup>1</sup> Р 2.1.10.3968–23.2.1.10. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 06.09.2023 г.). М.: Роспотребнадзор, 2023. 302 с.

<sup>2</sup> МР 2.1.10.0062–12. Количественная оценка неканцерогенного риска при воздействии химических веществ на основе построения эволюционных моделей: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 36 с.

<sup>3</sup> Исследования выполнены профильными специалистами, научными сотрудниками ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения».

Таблица 1 / Table 1

## Структура исследуемых групп

## Structure of the study groups

| Территория<br>Region                   | Группа детей<br>Group of children          | Объём<br>выборки, абс.<br>Sample volume,<br>abs | Мальчики,<br>абс.<br>Boys, abs | Девочки,<br>абс.<br>Girls, abs | Производство, выбросы которого формируют<br>аэрогенную экспозицию<br>Industry responsible for airborne exposure                                            |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Красноярский край<br>Krasnoyarsky kray | Группа наблюдения 1<br>Observation 1       | 312                                             | 146                            | 166                            | Алюминиевое и топливно-энергетическое<br>Aluminum and fuel and energy production                                                                           |
|                                        | Группа сравнения 1<br>Reference group 1    | 142                                             | 79                             | 63                             | Территория вне зоны аэрогенного воздействия выбросов указанных промышленных объектов<br>Area out of aerogenic impact of emissions of mentioned enterprises |
|                                        | Группа наблюдения 2<br>Observation group 2 | 371                                             | 185                            | 186                            | Медно-никелевое<br>Copper and nickel production                                                                                                            |
|                                        | Группа сравнения 2<br>Reference group 2    | 157                                             | 82                             | 75                             | Территория вне зоны аэрогенного воздействия выбросов указанных промышленных объектов<br>Area out of aerogenic impact of emissions of mentioned enterprises |
|                                        | Группа наблюдения 3<br>Observation group 3 | 464                                             | 252                            | 212                            | Металлургического глинозёма<br>Alumina metallurgy                                                                                                          |
|                                        | Группа сравнения 3<br>Reference group 3    | 48                                              | 22                             | 26                             | Территория вне зоны аэрогенного воздействия выбросов указанных промышленных объектов<br>Area out of aerogenic impact of emissions of mentioned enterprises |
| Иркутская область<br>Irkutsk region    | Группа наблюдения 4<br>Observation group 4 | 214                                             | 112                            | 102                            | Алюминиевое и деревообрабатывающее<br>Aluminum production and wood processing                                                                              |
|                                        | Группа наблюдения 5<br>Observation group 5 | 225                                             | 134                            | 91                             | Алюминиевое<br>Aluminum production                                                                                                                         |
|                                        | Группа сравнения 4<br>Reference group 4    | 122                                             | 58                             | 64                             | Территория вне зоны аэрогенного воздействия выбросов указанных промышленных объектов<br>Area out of aerogenic impact of emissions of mentioned enterprises |
| Всего<br>Total                         |                                            | 2055                                            | 1070                           | 985                            | Территория вне зоны аэрогенного воздействия выбросов указанных промышленных объектов<br>Area out of aerogenic impact of emissions of mentioned enterprises |

Медицинские осмотры проводились в рамках углублённого мониторинга здоровья детского населения. Из выборки целенаправленно исключали детей, находившихся в момент обследования в остром периоде инфекционных или соматических болезней. Сбор биологического материала (кровь, моча) выполняли в утренние часы натощак в условиях медицинских кабинетов детских садов квалифицированным медицинским персоналом.

Сформированный массив включал сопряжённые индивидуальные значения дозы металлов, концентрации меди, никеля, хрома и марганца в крови, алюминия в моче, а также патогенетически связанные с экспозицией значения лабораторных показателей и диагнозы (по МКБ-10). Использование ранее полученных материалов не требовало специального заключения этического комитета. Статистический анализ и математическое моделирование выполнены с помощью линейных и логистических регрессионных моделей. Их адекватность и информативность оценивали по критерию Фишера ( $F$ ) и коэффициента детерминации ( $R^2$ ) при  $p \leq 0,05$ . Для исключения случайных корреляций в моделирование включали только лабораторные показатели и нозологические формы, имеющие статистически достоверные различия с группой сравнения.

## Результаты

Установлена прямая дозозависимая связь между уровнем аэрогенной экспозиции металлов и их концентрациями в крови и моче (табл. 2).

Марганец и хром в крови значимы во всех пяти группах наблюдения. Аэрогенная экспозиция объясняет от 23 до 70% их общей вариативности ( $R^2 = 0,23-0,42$  для марганца,  $R^2 = 0,4-0,7$  для хрома). Во всех моделях зафиксирован стабильный эндогенный фон ( $0,008 \leq b_0 \leq 0,01$  мг/дм<sup>3</sup>

для марганца;  $0,0007 \leq b_0 \leq 0,0011$  мг/дм<sup>3</sup> для хрома), сопоставимый с группами сравнения. В группах наблюдения 1 и 5 содержание марганца в крови носит пологий характер ( $b_1 = 63,7$  и  $b_1 = 25$  123,75 соответственно), тогда как в группе наблюдения 2 зафиксирована высокая чувствительность популяции к воздействию данного металла ( $b_1 = 1314,38$ ). По хрому максимальный угловой коэффициент отмечен также в группе наблюдения 2. Свободные члены уравнений отражают стабильный фоновый уровень металлов (мг/дм<sup>3</sup>) во всех группах:  $0,89 \leq b_0 \leq 0,95$  для меди в крови;  $b_0 = 0,0008$  мг/дм<sup>3</sup> для никеля;  $0,0007 \leq b_0 \leq 0,011$  для хрома;  $0,008 \leq b_0 \leq 0,01$  мг/дм<sup>3</sup> для марганца;  $0,0022 \leq b_0 \leq 0,0028$  для алюминия в моче. Содержание данных металлов в биосредах отражает специфику промышленного профиля территорий. Связь «доза – уровень в крови» для никеля верифицирована только в группе наблюдения 2 ( $b_1 = 25,35$ ;  $R^2 = 0,64$ ;  $p = 0,0001$ ), для меди – в группах наблюдения 1 и 2 ( $901,24 \leq b_1 \leq 252,32$ ;  $R^2 = 0,32-0,55$ ;  $p = 0,002-0,04$ ). Информативность алюминия как маркера почечной экскреции аэрогенной дозы подтверждена для четырёх групп наблюдения: 1, 3, 4, 5 ( $5,76 \leq b_1 \leq 19,15$ ;  $R^2 = 0,37-0,7$ ;  $p = 0,0001-0,004$ ). Пример зависимости содержания алюминия в моче от его уровня в атмосферном воздухе представлен на рис. 1.

Установлены реперные уровни биомаркеров экспозиции (близкие к нижним границам референтных значений<sup>4</sup>): в крови – хрома ( $0,0011$  мг/дм<sup>3</sup>), марганца ( $0,011$  мг/дм<sup>3</sup>), никеля ( $0,002$  мг/дм<sup>3</sup>) и меди ( $0,912$  мг/дм<sup>3</sup>), в моче – алюминия ( $0,0032$  мг/дм<sup>3</sup>).

Анализ связей между концентрацией металлов в биосредах и изменениями лабораторных показателей позволил

<sup>1</sup> Клиническое руководство по лабораторным тестам. Под ред. Норберта У. Тица. М.: ЮНИМЕД-пресс, 2013. 960 с.

Таблица 2 / Table 2

Параметры моделей зависимости содержания металлов в биосредах от аэрогенной экспозиции  
Parameters of models of the relationship between metals contents in biological media and levels of airborne exposure

| Обследуемая группа<br>Study group | Вещество в атмосферном воздухе<br>Airborne chemicals | Среднегодовая концентрация в атмосферном воздухе, мг/дм³<br>Average annual concentration in ambient air, mg/dm³ | Доза, мг/(кг·сут)<br>Dose, mg/(kg·day) | Биомаркёр экспозиции<br>Exposure biomarker | Среднегрупповая концентрация металла в биосреде, мг/дм³<br>Average-group metal concentration in biological media, mg/dm³ | Характеристика модели   Model characteristics |                 |                                                                | Критерий статистической значимости<br>Significance criterion<br>$p \leq 0.05$ |                                                   |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                   |                                                      |                                                                                                                 |                                        |                                            |                                                                                                                          | Параметры модели<br>Model parameters          |                 | Коэффициент детерминации<br>Determination coefficient<br>$R^2$ |                                                                               | Критерий Фишера<br>Fisher's test<br>$F \geq 3.65$ |
|                                   |                                                      |                                                                                                                 |                                        |                                            |                                                                                                                          | $b_0 \pm m$                                   | $b_1 \pm m$     |                                                                |                                                                               |                                                   |
| ГН 1<br>OG 1                      | Марганца оксид<br>Manganese oxide                    | 0.000046 ± 0.000011                                                                                             | 0.000062 ± 0.000015                    | Марганец в крови<br>Manganese in blood     | 0.015 ± 0.001                                                                                                            | 0.010 ± 0.002                                 | 63.70 ± 11.11   | 0.35                                                           | 59.64                                                                         | 0.030                                             |
| ГН 1<br>RG 1                      |                                                      | 0.0000078 ± 0.000002                                                                                            | 0.000007 ± 0.000002                    |                                            | 0.011 ± 0.001                                                                                                            | 0.010 ± 0.002                                 | 63.70 ± 11.11   | 0.35                                                           | 59.64                                                                         | 0.030                                             |
| ГН 2<br>OG 2                      |                                                      | 0.000002 ± 0.000010                                                                                             | 0.0000027 ± 0.000001                   |                                            | 0.013 ± 0.001                                                                                                            | 0.010 ± 0.002                                 | 1314.38 ± 29.43 | 0.40                                                           | 8.80                                                                          | 0.0001                                            |
| ГН 2<br>RG 2                      |                                                      | 0.000001 ± 0.000010                                                                                             | 0.0000012 ± 0.000001                   |                                            | 0.011 ± 0.0002                                                                                                           | 0.010 ± 0.002                                 | 1314.38 ± 29.43 | 0.40                                                           | 8.80                                                                          | 0.0001                                            |
| ГН 3<br>OG 3                      |                                                      | 0.000012 ± 0.000002                                                                                             | 0.000016 ± 0.000002                    |                                            | 0.012 ± 0.001                                                                                                            | 0.010 ± 0.003                                 | 211.50 ± 23.45  | 0.32                                                           | 22.45                                                                         | 0.008                                             |
| ГН 3<br>RG 3                      | Медь оксид<br>Copper oxide                           | 0.000006 ± 0.000001                                                                                             | 0.0000081 ± 0.000002                   | Медь в крови<br>Copper in blood            | 0.010 ± 0.002                                                                                                            | 0.010 ± 0.003                                 | 211.50 ± 23.45  | 0.32                                                           | 22.45                                                                         | 0.008                                             |
| ГН 4<br>OG 4                      |                                                      | 0.000023 ± 0.00001                                                                                              | 0.00003 ± 0.00001                      |                                            | 0.012 ± 0.001                                                                                                            | 0.008 ± 0.002                                 | 164.49 ± 39.35  | 0.23                                                           | 12.87                                                                         | 0.0001                                            |
| ГН 5<br>OG 5                      |                                                      | 0.000036 ± 0.000011                                                                                             | 0.000049 ± 0.000011                    |                                            | 0.014 ± 0.001                                                                                                            | 0.009 ± 0.002                                 | 123.75 ± 27.11  | 0.42                                                           | 10.54                                                                         | 0.0001                                            |
| ГН 4, 5<br>RG 4, 5                |                                                      | 0.000011 ± 0.00001                                                                                              | 0.00001 ± 0.000002                     |                                            | 0.008 ± 0.002                                                                                                            | 0.009 ± 0.002                                 | 123.75 ± 27.11  | 0.42                                                           | 10.54                                                                         | 0.0001                                            |
| ГН 1<br>OG 1                      |                                                      | 0.00006 ± 0.000015                                                                                              | 0.00008 ± 0.000012                     |                                            | 0.929 ± 0.025                                                                                                            | 0.89 ± 0.28                                   | 901.24 ± 70.41  | 0.32                                                           | 42.16                                                                         | 0.040                                             |
| ГН 1<br>RG 1                      | 0.000011 ± 0.000004                                  | 0.000013 ± 0.000002                                                                                             | 0.853 ± 0.025                          | 0.89 ± 0.28                                | 901.24 ± 70.41                                                                                                           | 0.32                                          | 42.16           | 0.040                                                          |                                                                               |                                                   |
| ГН 2<br>OG 2                      | 0.00031 ± 0.00002                                    | 0.00042 ± 0.00010                                                                                               | 1.032 ± 0.034                          | 0.95 ± 0.15                                | 252.32 ± 35.60                                                                                                           | 0.55                                          | 27.99           | 0.002                                                          |                                                                               |                                                   |
| ГН 2<br>RG 2                      | 0.000012 ± 0.000003                                  | 0.000016 ± 0.000005                                                                                             | 0.951 ± 0.022                          | 0.95 ± 0.15                                | 252.32 ± 35.60                                                                                                           | 0.55                                          | 27.99           | 0.002                                                          |                                                                               |                                                   |
| ГН 1<br>OG 1                      | Никеля оксид<br>Nickel oxide                         | 0.0003 ± 0.00005                                                                                                | 0.00041 ± 0.00010                      | Никель в крови<br>Nickel in blood          | 0.0098 ± 0.002                                                                                                           | 0.0008 ± 0.0001                               | 25.36 ± 5.06    | 0.64                                                           | 29.87                                                                         | 0.0001                                            |
| ГН 1<br>RG 1                      |                                                      | 0.00001 ± 0.000002                                                                                              | 0.000014 ± 0.0001                      |                                            | 0.001 ± 0.0001                                                                                                           | 0.0008 ± 0.0001                               | 25.36 ± 5.06    | 0.64                                                           | 29.87                                                                         | 0.0001                                            |

Продолжение Таблицы 2 на стр. 1015 / Continuation of Table 2 on page 1015

Продолжение Таблицы 2. Начало на стр. 1014 / Continuation of Table 2. Start on page 1014

| Обследуемая группа<br>Study group | Вещество в атмосферном воздухе<br>Airborne chemicals | Среднегодовая концентрация в атмосферном воздухе, мг/дм³<br>Average annual concentration in ambient air, mg/dm³ | Доза, мг/(кг·сут)<br>Dose, mg/(kg·day) | Биомаркёр экспозиции<br>Exposure biomarker | Среднегрупповая концентрация металла в биосреде, мг/дм³<br>Average-group metal concentration in biological media, mg/dm³ | Характеристика модели   Model characteristics |                 |             |                                                                | Критерий статистической значимости<br>Significance criterion<br>$p \leq 0.05$ |                                                   |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|-------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                   |                                                      |                                                                                                                 |                                        |                                            |                                                                                                                          | Параметры модели<br>Model parameters          |                 |             | Коэффициент детерминации<br>Determination coefficient<br>$R^2$ |                                                                               | Критерий Фишера<br>Fisher's test<br>$F \geq 3.65$ |
|                                   |                                                      |                                                                                                                 |                                        |                                            |                                                                                                                          | $b_0 \pm m$                                   | $b_1 \pm m$     |             |                                                                |                                                                               |                                                   |
| ГН 1<br>OG 1                      | Хрома (VI) оксид<br>Chromium (VI) oxide              | 0.00002 ± 0.000003                                                                                              | 0.000027 ± 0.000002                    | Хром в крови<br>Chromium in blood          | 0.008 ± 0.001                                                                                                            | 0.0010 ± 0.00001                              | 259.99 ± 101.69 | 0.46        | 62.77                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГС 1<br>RG 1                      |                                                      | 0.000012 ± 0.000002                                                                                             | 0.000016 ± 0.000004                    |                                            | 0.0011 ± 0.0002                                                                                                          | 0.0010 ± 0.00001                              | 259.99 ± 101.69 | 0.46        | 62.77                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 2<br>OG 2                      | Хрома (VI) оксид<br>Chromium (VI) oxide              | 0.00000074 ± 0.0000002                                                                                          | 0.000001 ± 0.0000002                   | Хром в крови<br>Chromium in blood          | 0.004 ± 0.001                                                                                                            | 0.0011 ± 0.0001                               | 662.74 ± 98.2   | 0.40        | 18.19                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГС 2<br>RG 2                      |                                                      | 0.00000037 ± 0.00000011                                                                                         | 0.0000005 ± 0.0000001                  |                                            | 0.0011 ± 0.0001                                                                                                          | 0.0011 ± 0.0001                               | 662.74 ± 98.2   | 0.40        | 18.19                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 3<br>OG 3                      | Хрома (VI) оксид<br>Chromium (VI) oxide              | 0.000023 ± 0.000002                                                                                             | 0.000031 ± 0.000005                    | Хром в крови<br>Chromium in blood          | 0.006 ± 0.0002                                                                                                           | 0.0007 ± 0.0002                               | 161.87 ± 42.50  | 0.62        | 260.15                                                         | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГС 3<br>RG 3                      |                                                      | 0.00001 ± 0.000003                                                                                              | 0.0000014 ± 0.0000003                  |                                            | 0.0012 ± 0.0004                                                                                                          | 0.0007 ± 0.0002                               | 161.87 ± 42.50  | 0.62        | 260.15                                                         | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 4<br>OG 4                      | Хрома (VI) оксид<br>Chromium (VI) oxide              | 0.00002 ± 0.000003                                                                                              | 0.000027 ± 0.000002                    | Хром в крови<br>Chromium in blood          | 0.0038 ± 0.0003                                                                                                          | 0.0010 ± 0.0002                               | 105.44 ± 55.4   | 0.49        | 28.32                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 5<br>OG 5                      |                                                      | 0.00002 ± 0.000003                                                                                              | 0.000027 ± 0.000002                    |                                            | 0.0056 ± 0.0041                                                                                                          | 0.0010 ± 0.0003                               | 102.00 ± 21.6   | 0.70        | 188.77                                                         | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГС 4, 5<br>RG 4, 5                | Хрома (VI) оксид<br>Chromium (VI) oxide              | 0.000010 ± 0.000002                                                                                             | 0.000014 ± 0.000003                    | Хром в крови<br>Chromium in blood          | 0.0010 ± 0.0004                                                                                                          | 0.0010 ± 0.0003                               | 102.00 ± 21.6   | 0.70        | 188.77                                                         | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 1<br>OG 1                      |                                                      | 0.00053 ± 0.00004                                                                                               | 0.0007 ± 0.00012                       |                                            | Алюминий в моче<br>Aluminum in urine                                                                                     | 0.007 ± 0.002                                 | 0.0022 ± 0.0006 | 5.76 ± 1.42 | 0.37                                                           | 25.34                                                                         | 0.0001                                            |
| ГС 1<br>RG 1                      | Алюминия (III) оксид<br>Aluminum (III) oxide         | 0.00022 ± 0.00001                                                                                               | 0.00029 ± 0.00007                      | Алюминий в моче<br>Aluminum in urine       | 0.003 ± 0.0009                                                                                                           | 0.0022 ± 0.0006                               | 5.76 ± 1.42     | 0.37        | 25.34                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 3<br>OG 3                      |                                                      | 0.0026 ± 0.00035                                                                                                | 0.0035 ± 0.0010                        |                                            | 0.019 ± 0.003                                                                                                            | 0.0028 ± 0.0007                               | 4.57 ± 1.21     | 0.40        | 22.17                                                          | 0.004                                                                         |                                                   |
| ГС 3<br>RG 3                      | Алюминия (III) оксид<br>Aluminum (III) oxide         | 0.00059 ± 0.00014                                                                                               | 0.00080 ± 0.00012                      | Алюминий в моче<br>Aluminum in urine       | 0.003 ± 0.0008                                                                                                           | 0.0028 ± 0.0007                               | 4.57 ± 1.21     | 0.40        | 22.17                                                          | 0.004                                                                         |                                                   |
| ГН 4<br>OG 4                      |                                                      | 0.00063 ± 0.00012                                                                                               | 0.00085 ± 0.00015                      |                                            | 0.019 ± 0.003                                                                                                            | 0.0022 ± 0.0008                               | 19.15 ± 3.36    | 0.56        | 29.35                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГН 5<br>OG 5                      | Алюминия (III) оксид<br>Aluminum (III) oxide         | 0.00062 ± 0.00012                                                                                               | 0.00084 ± 0.00015                      | Алюминий в моче<br>Aluminum in urine       | 0.012 ± 0.002                                                                                                            | 0.0023 ± 0.0005                               | 12.45 ± 2.13    | 0.49        | 22.41                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |
| ГС 4, 5<br>RG 4, 5                |                                                      | 0.00011 ± 0.00002                                                                                               | 0.00014 ± 0.00003                      |                                            | 0.0031 ± 0.0009                                                                                                          | 0.0023 ± 0.0005                               | 12.45 ± 2.13    | 0.49        | 22.41                                                          | 0.0001                                                                        |                                                   |

Примечание. ГН – группа наблюдения; ГС – группа сравнения.  
Note: OG – observation group; RG – reference group.

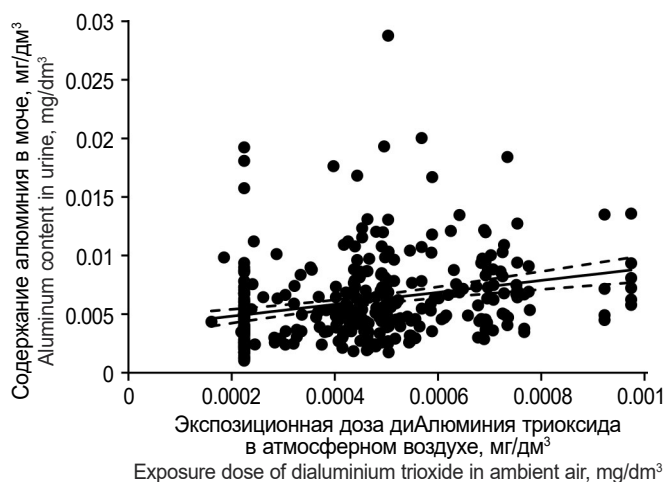


**Рис. 1.** Пример модели зависимости содержания алюминия в моче детей группы наблюдения 1 от экспозиционной дозы диалюминия триоксида в атмосферном воздухе.

**Fig. 1.** An example of a model of the dependence of the aluminum content in the urine in children of observation group 1 on the concentration of dialuminum trioxide in the ambient air.

обосновать профиль донозологических биомаркёров негативных эффектов. Комплекс содержит показатели оксидативного стресса (рост гидроперекисей липидов и малонового диальдегида), маркёры митохондриального апоптоза (индуцируемая экспрессия белка Вах), параметры дисбаланса клеточного (повышение лимфоцитов CD16<sup>+</sup>56<sup>+</sup> и CD19<sup>+</sup>) и гуморального иммунитета (специфические к металлам иммуноглобулины), показатели состояния барьерных тканей (повышение эозинофилов и индекса эозинофилии) (табл. 3).

Развитие нарушений представляет собой последовательный каскад реакций, начинающихся на молекулярно-клеточном уровне. Универсальными процессами являются инициация липопероксидации под влиянием марганца, меди, хрома в крови и алюминия в моче ( $R^2 = 0,28-0,86$ ;  $0,65 \leq b_1 \leq 330,76$ ;  $p = 0,0001-0,003$ ) и запуск митохондриального пути апоптоза при действии марганца и хрома в крови ( $R^2 = 0,66-0,73$ ;  $281,6 \leq b_1 \leq 472,77$ ;  $p = 0,0001$ ). Данные молекулярные сдвиги служат триггером системной перестройки иммунологической резистентности.

Повышенные концентрации марганца, никеля, хрома и алюминия вызывают субпопуляционный дисбаланс лимфоцитов ( $R^2 = 0,31-0,91$ ;  $22,69 \leq b_1 \leq 167,16$ ;  $p = 0,0001-0,002$ ) и гиперпродукцию специфических иммуноглобулинов ( $R^2 = 0,28-0,73$ ;  $12,06 \leq b_1 \leq 342,34$ ;  $p = 0,0001-0,012$ ). На уровне барьерных тканей избыток марганца и никеля в крови, алюминия в моче манифестирует локальной эозинофильной инфильтрацией слизистых оболочек ( $R^2 = 0,37-0,84$ ;  $14,23 \leq b_1 \leq 207,01$ ;  $p = 0,0001$ ). Выявлена половая специфика механизмов повреждения. У девочек патологический каскад преимущественно смещён в сторону системного иммунного ответа и нейроэндокринных нарушений. Установлено, что повышенный уровень хрома в крови вызывает угнетение тиреоидного статуса через снижение свободного Т4 ( $R^2 = 0,26-0,55$ ;  $58,2 \leq b_1 \leq 311,39$ ;  $p = 0,0001-0,002$ ), что ассоциировано с развитием эндокринных расстройств ( $R^2 = 0,67-0,7$ ;  $144,77 \leq b_1 \leq 399,85$ ;  $p = 0,0001-0,001$ ). Нейротропный вектор марганца, меди, никеля, алюминия реализуется по центральному регуляторному типу, вовлекая серотонинергическую трансмиссию ( $R^2 = 0,3-0,73$ ;  $7,86 \leq b_1 \leq 153,43$ ;  $p = 0,0001-0,036$ ) и гиперкортизолемию ( $R^2 = 0,66-0,7$ ;  $3,88 \leq b_1 \leq 55,98$ ;  $p = 0,0001$ ). Манифестация процесса проявляется в виде расстройств вегетативной нервной системы ( $R^2 = 0,39-0,7$ ;  $77,02 \leq b_1 \leq 301,21$ ;  $p = 0,0001-0,0002$ ).

Дисбаланс нейроэндокринной регуляции при повышенной концентрации алюминия в моче и хрома в крови усугубляет патологический вектор со стороны костной системы, что сопровождается поражением опорно-двигательного аппарата в форме деформирующих дорсопатий ( $R^2 = 0,54-0,63$ ;  $22,36 \leq b_1 \leq 187,1$ ;  $p = 0,0001$ ) и вальгусной деформации ( $R^2 = 0,63$ ;  $b_1 = 190,37$ ;  $p = 0,0001$ ). Дополнительно у девочек медь и хром индуцируют угнетение эритропоэза со снижением общего числа эритроцитов и их среднего объёма, цветного показателя крови ( $R^2 = 0,76-0,95$ ;  $8,13 \leq b_1 \leq 837,57$ ;  $p = 0,0001$ ).

У мальчиков детерминированный отклик реализуется через истощение антиоксидантной защиты, интенсификацию перекисного окисления липидов и клеточный цитолиз. Под влиянием хрома, марганца и алюминия фиксируется повышение гидроперекисей липидов ( $R^2 = 0,36-0,68$ ;  $9,75 \leq b_1 \leq 273,81$ ;  $p = 0,0001$ ) на фоне резкого снижения АОА плазмы ( $R^2 = 0,36-0,94$ ;  $79,96 \leq b_1 \leq 103,19$ ;  $p = 0,0001$ ). Этот дисбаланс инициирует повреждение нейронов, что подтверждается ростом НСЕ ( $R^2 = 0,61$ ;  $b_1 = 183,01$ ;  $p = 0,0001$ ) (рис. 2).

Данный процесс приводит к развитию когнитивно-речевых расстройств и нарастанию темповых задержек развития речи и языка ( $R^2 = 0,46-0,58$ ;  $41,75 \leq b_1 \leq 265,6$ ;  $p = 0,0001$ ) (рис. 3). Одновременно фиксируется раннее поражение барьерных тканей, что проявляется дестабилизацией тучных клеток кожи с манифестацией atopического дерматита при повышенном уровне хрома в крови ( $R^2 = 0,45-0,66$ ;  $0,61 \leq b_1 \leq 205,91$ ;  $p = 0,0001$ ) и алюминия в моче ( $R^2 = 0,47-0,76$ ;  $50,61 \leq b_1 \leq 142,35$ ;  $p = 0,0001$ ).

Кроме этого, отмечается дисбаланс липидного обмена, что характеризуется снижением ЛПВП ( $R^2 = 0,37$ ;  $b_1 = 76,15$ ;  $p = 0,0001$ ) и ростом триглицеридов ( $R^2 = 0,69-0,75$ ;  $96,42 \leq b_1 \leq 290,26$ ;  $p = 0,0001$ ). Представленный дисбаланс выступает предвестником нарушения обмена липопротеинов ( $R^2 = 0,63$ ;  $b_1 = 368,54$ ;  $p = 0,0001$ ) и жировой дегенерации печени ( $R^2 = 0,49$ ;  $b_1 = 51,86$ ;  $p = 0,0001$ ). На фоне ускоренного истощения антиоксидантной защиты алюминий, марганец напрямую повреждают остеобласты, вызывая дисбаланс остеогенеза, что приводит к формированию сколиоза ( $R^2 = 0,61-0,85$ ;  $64,14 \leq b_1 \leq 190,78$ ;  $p = 0,0001$ ) и плоской стопы ( $R^2 = 0,90$ ;  $b_1 = 89,74$ ;  $p = 0,0001$ ).

## Обсуждение

Обнаруженная зависимость концентрации металлов в биосредах от их аэрогенной экспозиции, по всей видимости, отражает фундаментальные закономерности транслокации веществ, в том числе металлов, через аэрогематический барьер путём пассивной диффузии во внутреннюю среду организма [10]. Перенос ионов марганца, хрома, меди и алюминия через мембраны альвеоцитов может реализовываться с помощью специфических транспортных белков [11]. Известно, что алюминий быстро выводится почками, поэтому его уровень в разовой порции мочи с высокой долей вероятности прямо пропорционален общему количеству вещества, попавшему в кровоток [12]. Полученные параметры зависимости подтверждают, что определённая доля повышенной концентрации металлов в биосредах формируется за счёт ингаляционного поступления ( $R^2 = 0,23-0,7$ ). Превышение установленных реперных концентраций металлов в крови и моче, по-видимому, способно инициировать патогенетический каскад реакций со стороны органов-мишеней. Можно предположить, что начальное звено повреждения локализовано на субклеточном уровне: оксидативный стресс и деструкция мембран, вероятно, запускают программируемую клеточную гибель через экспрессию проапоптопического белка Вах ( $R^2 = 0,66-0,73$ ). Такое объяснение согласуется с фундаментальными общебиологическими закономерностями развития донозологических нарушений, описанными в современной литературе [13–17]. Выявленные молекулярные сдвиги, очевидно, детерминируют перестройку иммуно-

Таблица 3 / Table 3

Достоверные модели зависимости отклонения от нормы лабораторных показателей от содержания металлов в биосредах детей,  $p \leq 0,05$   
Reliable models of the relationship between the deviation of laboratory indicators from metals contents in children's biological media,  $p \leq 0.05$

| Биомаркёр экспозиции<br>Biomarker of exposure | Пол<br>Sex | Группа наблюдений<br>Observation group                                                                                                                                                                                | Биомаркёр негативного эффекта<br>Biomarker of adverse effect                                                                                           | Вектор опасности отклонения показателя<br>Vector of hazard deviation of the index | Параметры модели   Model parameters                 |            |                |                                                                    | Сравнительный уровень металлов, мг/дм³<br>Reference metal level, mg/dm³ |            |        |
|-----------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------|----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------|--------|
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                        |                                                                                   | Характеристика модели<br>Model description          |            |                | Коэффициент детерминации<br>Determination coefficient<br><i>R²</i> |                                                                         |            |        |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                        |                                                                                   | Критерий Фишера<br>Fisher's test<br><i>F</i> > 3,65 |            |                |                                                                    |                                                                         |            |        |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                        |                                                                                   | b <sub>0</sub>                                      | ± <i>m</i> | b <sub>1</sub> |                                                                    |                                                                         | ± <i>m</i> |        |
| Марганец в крови<br>Manganese in blood        | Д          | 1                                                                                                                                                                                                                     | Малоновый диальдегид   Malonic dialdehyde                                                                                                              | ↑                                                                                 | -1.53                                               | 0.32       | 96.55          | 20.28                                                              | 0.66                                                                    | 167.56     | 0.011  |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       | Vax   Vax protein                                                                                                                                      | ↑                                                                                 | -4.15                                               | 0.87       | 281.60         | 59.14                                                              | 0.73                                                                    | 301.58     | 0.011  |
|                                               |            | 2                                                                                                                                                                                                                     | Лимфоциты CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> , абс.   Lymphocytes CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> , abs                                               | ↑                                                                                 | -4.05                                               | 0.85       | 101.45         | 21.30                                                              | 0.36                                                                    | 21.01      | 0.011  |
|                                               |            | 4                                                                                                                                                                                                                     | IgE, специфический к марганцу   IgE specific to manganese<br>Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides                                              | ↑                                                                                 | -2.45                                               | 0.44       | 49.55          | 8.92                                                               | 0.37                                                                    | 44.17      | 0.011  |
| М                                             | 1          | Индекс эозинофилии*   Eosinophilic index*                                                                                                                                                                             | ↑                                                                                                                                                      | -5.31                                                                             | 0.96                                                | 330.76     | 59.54          | 0.73                                                               | 110.48                                                                  | 0.011      |        |
|                                               |            | Специфический к марганцу IgE   IgE specific to manganese                                                                                                                                                              | ↑                                                                                                                                                      | -4.58                                                                             | 0.96                                                | 86.75      | 18.22          | 0.84                                                               | 567.79                                                                  | 0.012      |        |
|                                               | 3          | Специфический к марганцу IgE   IgE specific to manganese                                                                                                                                                              | ↑                                                                                                                                                      | -1.48                                                                             | 0.31                                                | 63.98      | 13.44          | 0.66                                                               | 411.78                                                                  | 0.011      |        |
|                                               | 4          | Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides                                                                                                                                                                          | ↑                                                                                                                                                      | -5.11                                                                             | 0.92                                                | 129.97     | 23.39          | 0.69                                                               | 132.36                                                                  | 0.013      |        |
| Мель в крови<br>Copper in blood               | Д          | 1                                                                                                                                                                                                                     | Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides<br>Антиоксидантная активность плазмы   Antioxidant plasma activity                                        | ↑                                                                                 | -4.85                                               | 0.87       | 245.86         | 44.25                                                              | 0.68                                                                    | 35.64      | 0.011  |
|                                               |            | 2                                                                                                                                                                                                                     | Антиоксидантная активность плазмы   Antioxidant plasma activity<br>Малоновый диальдегид   Malonic dialdehyde                                           | ↓                                                                                 | -0.57                                               | 0.12       | 79.96          | 16.79                                                              | 0.94                                                                    | 3509.80    | 0.011  |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       | Малоновый диальдегид   Malonic dialdehyde                                                                                                              | ↑                                                                                 | -0.34                                               | 0.06       | 0.65           | 0.12                                                               | 0.35                                                                    | 11.78      | 0.912  |
|                                               |            | Кортизол   Cortisol                                                                                                                                                                                                   | ↑                                                                                                                                                      | -6.79                                                                             | 1.22                                                | 3.88       | 0.70           | 0.66                                                               | 118.28                                                                  | 0.992      |        |
| Никель в крови<br>Nickel in blood             | Д          | 1                                                                                                                                                                                                                     | Средний объём эритроцитов   Mean corpuscular volume                                                                                                    | ↓                                                                                 | -10.2                                               | 1.83       | 8.13           | 1.46                                                               | 0.76                                                                    | 194.81     | 0.990  |
|                                               |            | 2                                                                                                                                                                                                                     | Лимфоциты CD19 <sup>+</sup> , отн.   Lymphocytes CD19 <sup>+</sup> , rel.<br>Специфический к никелю IgE   IgE specific to nickel                       | ↑                                                                                 | -2.56                                               | 0.46       | 60.15          | 10.83                                                              | 0.44                                                                    | 28.95      | 0.002  |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       | Индекс эозинофилии*   Eosinophilia index*                                                                                                              | ↑                                                                                 | -2.13                                               | 0.38       | 47.03          | 8.47                                                               | 0.70                                                                    | 206.89     | 0.0028 |
|                                               |            | Кортизол   Cortisol                                                                                                                                                                                                   | ↑                                                                                                                                                      | -3.68                                                                             | 0.66                                                | 56.36      | 10.14          | 0.75                                                               | 156.52                                                                  | 0.012      |        |
| Хром в крови<br>Chromium in blood             | М          | 2                                                                                                                                                                                                                     | Специфический к никелю IgE   IgE specific to nickel                                                                                                    | ↑                                                                                 | -3.01                                               | 0.54       | 55.98          | 10.08                                                              | 0.88                                                                    | 431.81     | 0.010  |
|                                               |            |                                                                                                                                                                                                                       | Специфический к никелю IgE   IgE specific to nickel                                                                                                    | ↑                                                                                 | -1.71                                               | 0.31       | 12.06          | 2.17                                                               | 0.33                                                                    | 6.91       | 0.002  |
|                                               |            | 4                                                                                                                                                                                                                     | Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides<br>T4 свободный   Free T4                                                                                 | ↑                                                                                 | -2.82                                               | 0.51       | 74.83          | 13.47                                                              | 0.51                                                                    | 14.46      | 0.0011 |
|                                               |            | 4                                                                                                                                                                                                                     | T4 свободный   Free T4                                                                                                                                 | ↓                                                                                 | -2.67                                               | 0.48       | 58.20          | 10.48                                                              | 0.26                                                                    | 11.60      | 0.0038 |
| Алюминий в моче<br>Aluminum in urine          | Д          | 3                                                                                                                                                                                                                     | Серотонин   Serotonin                                                                                                                                  | ↑                                                                                 | -3.85                                               | 0.69       | 311.39         | 56.05                                                              | 0.55                                                                    | 31.04      | 0.0031 |
|                                               |            | 5                                                                                                                                                                                                                     | Цветной показатель   Color index                                                                                                                       | ↓                                                                                 | -4.96                                               | 0.89       | 153.43         | 27.62                                                              | 0.89                                                                    | 285.26     | 0.0033 |
|                                               |            | 1                                                                                                                                                                                                                     | Лимфоциты CD19 <sup>+</sup> , абс.   Lymphocytes CD19 <sup>+</sup> , abs.<br>Лимфоциты CD19 <sup>+</sup> , отн.   Lymphocytes CD19 <sup>+</sup> , rel. | ↑                                                                                 | -6.52                                               | 1.17       | 837.57         | 150.76                                                             | 0.95                                                                    | 423.38     | 0.0030 |
|                                               |            | 2                                                                                                                                                                                                                     | Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides<br>Триглицериды   Triglycerides                                                                           | ↑                                                                                 | -3.43                                               | 0.62       | 88.36          | 15.90                                                              | 0.32                                                                    | 12.52      | 0.0049 |
| М                                             | 3          | Vax   Vax protein                                                                                                                                                                                                     | ↑                                                                                                                                                      | -3.69                                                                             | 0.66                                                | 167.16     | 30.09          | 0.91                                                               | 728.50                                                                  | 0.0033     |        |
|                                               |            | Специфический к хрому IgE   IgE specific to chromium<br>Нейронспецифическая энзолаза   Neuron-specific enolase                                                                                                        | ↑                                                                                                                                                      | -2.91                                                                             | 0.52                                                | 273.81     | 49.29          | 0.67                                                               | 85.09                                                                   | 0.0011     |        |
|                                               | 1          | Триглицериды   Triglycerides                                                                                                                                                                                          | ↑                                                                                                                                                      | -5.68                                                                             | 1.02                                                | 290.26     | 52.25          | 0.75                                                               | 355.37                                                                  | 0.0029     |        |
|                                               | 3          | Вектор опасности отклонения показателя   Vector of hazard deviation of the index                                                                                                                                      | ↑                                                                                                                                                      | -3.03                                                                             | 0.55                                                | 472.77     | 85.10          | 0.66                                                               | 86.29                                                                   | 0.002      |        |
| М                                             | 5          | Специфический к хрому IgE   IgE specific to chromium<br>Нейронспецифическая энзолаза   Neuron-specific enolase                                                                                                        | ↑                                                                                                                                                      | -4.95                                                                             | 0.89                                                | 342.34     | 61.62          | 0.58                                                               | 47.88                                                                   | 0.003      |        |
|                                               |            | Нейронспецифическая энзолаза   Neuron-specific enolase                                                                                                                                                                | ↑                                                                                                                                                      | -3.09                                                                             | 0.56                                                | 183.01     | 32.94          | 0.61                                                               | 87.39                                                                   | 0.003      |        |
|                                               | 1          | Лимфоциты CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> , абс.   CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> -lymphocytes, abs.<br>Лимфоциты CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> , абс.   CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> -lymphocytes, abs | ↑                                                                                                                                                      | -4.44                                                                             | 0.80                                                | 148.41     | 26.71          | 0.89                                                               | 344.99                                                                  | 0.0035     |        |
|                                               | 3          | Лимфоциты CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> , абс.   CD16 <sup>+</sup> 56 <sup>+</sup> -lymphocytes, abs                                                                                                              | ↑                                                                                                                                                      | -3.00                                                                             | 0.54                                                | 22.69      | 4.08           | 0.31                                                               | 19.43                                                                   | 0.0077     |        |
| Алюминий в моче<br>Aluminum in urine          | Д          | 1                                                                                                                                                                                                                     | Специфический к алюминию IgG   IgG specific to aluminum                                                                                                | ↑                                                                                 | -5.05                                               | 0.91       | 204.79         | 36.86                                                              | 0.73                                                                    | 392.05     | 0.0036 |
|                                               |            | 4                                                                                                                                                                                                                     | Специфический к алюминию IgG   IgG specific to aluminum                                                                                                | ↑                                                                                 | -0.80                                               | 0.14       | 54.55          | 9.82                                                               | 0.66                                                                    | 95.45      | 0.0032 |
|                                               |            | 3                                                                                                                                                                                                                     | Серотонин   Serotonin                                                                                                                                  | ↑                                                                                 | -3.13                                               | 0.56       | 7.86           | 1.41                                                               | 0.30                                                                    | 4.50       | 0.0078 |
|                                               |            | 1                                                                                                                                                                                                                     | Индекс эозинофилии*   Eosinophilic index*<br>Малоновый диальдегид   Malonic dialdehyde                                                                 | ↑                                                                                 | -3.86                                               | 0.69       | 207.01         | 37.26                                                              | 0.37                                                                    | 37.21      | 0.0032 |
| М                                             | 1          | Триглицериды   Triglycerides<br>Специфический к алюминию IgG   IgG specific to aluminum                                                                                                                               | ↑                                                                                                                                                      | -0.61                                                                             | 0.11                                                | 46.70      | 8.41           | 0.27                                                               | 14.95                                                                   | 0.0035     |        |
|                                               |            | Антиоксидантная активность   Antioxidant activity                                                                                                                                                                     | ↑                                                                                                                                                      | -3.77                                                                             | 0.68                                                | 96.42      | 17.36          | 0.69                                                               | 172.27                                                                  | 0.0039     |        |
|                                               | 4          | Холестерин ЛПВП   HDL cholesterol                                                                                                                                                                                     | ↑                                                                                                                                                      | -1.34                                                                             | 0.24                                                | 96.25      | 17.33          | 0.28                                                               | 43.80                                                                   | 0.0032     |        |
|                                               |            | Холестерин ЛПВП   HDL cholesterol                                                                                                                                                                                     | ↓                                                                                                                                                      | -0.14                                                                             | 0.03                                                | 103.19     | 18.57          | 0.36                                                               | 105.28                                                                  | 0.0035     |        |
| М                                             | 4          | Гидроперекиси липидов   Lipid hydroperoxides<br>Эозинофилы*   Eosinophils*                                                                                                                                            | ↑                                                                                                                                                      | -3.80                                                                             | 0.68                                                | 76.15      | 13.71          | 0.37                                                               | 10.54                                                                   | 0.0039     |        |
|                                               |            | Эозинофилы*   Eosinophils*                                                                                                                                                                                            | ↑                                                                                                                                                      | -2.63                                                                             | 0.47                                                | 9.75       | 1.76           | 0.36                                                               | 7.34                                                                    | 0.032      |        |
|                                               |            | Эозинофилы*   Eosinophils*                                                                                                                                                                                            | ↑                                                                                                                                                      | -0.57                                                                             | 0.10                                                | 14.23      | 2.56           | 0.43                                                               | 117.12                                                                  | 0.0052     |        |
|                                               |            | Эозинофилы*   Eosinophils*                                                                                                                                                                                            | ↑                                                                                                                                                      |                                                                                   |                                                     |            |                |                                                                    |                                                                         |            |        |

Примечание. Д – девочки; М – мальчики; ↑ – повышение; ↓ – понижение; \* – показатель определяли в назальном секрете.  
Note: D – girls; M – boys; ↑ – rise; ↓ – fall; \* – indicator was determined in nasal secretions.

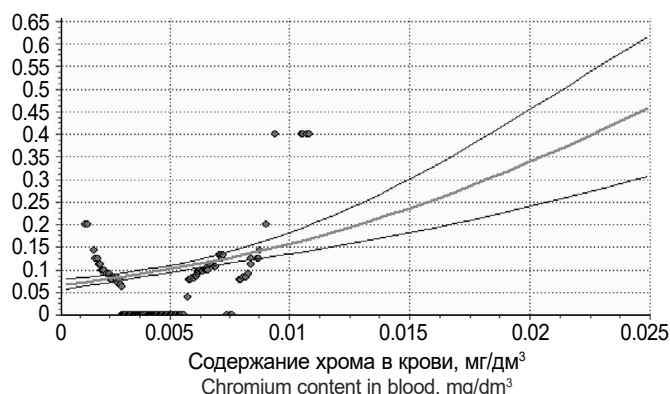


**Рис. 2.** Пример модели зависимости вероятности повышения нейронспецифической энлазы от содержания хрома в крови мальчиков группы наблюдения 5.

**Fig. 2.** An example of a model of the dependence of the probability of an increase in neuron-specific enolase on the chromium content in the blood in boys of observation group 5.

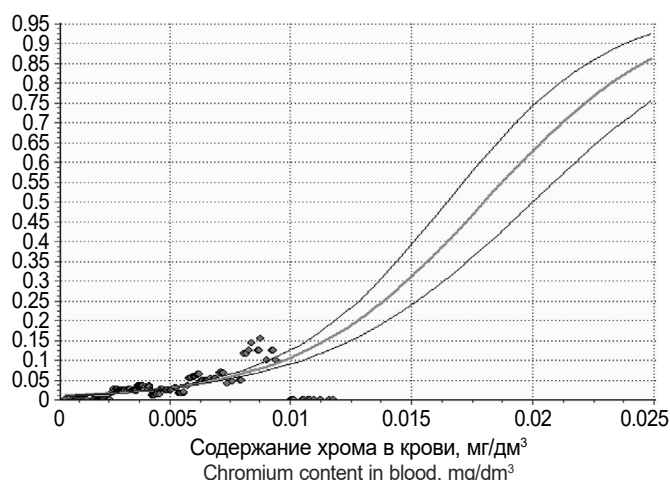


**Рис. 3.** Пример модели зависимости вероятности развития расстройств речи и языка (МКБ-10: F80.9) от содержания хрома в крови мальчиков группы наблюдения 5.

**Fig. 3.** An example of a model of the dependence of the probability of developing speech and language disorders (ICD-10: F80.9) on the chromium content in the blood in boys from observation group 5.

логической резистентности детского организма, затрагивающей клеточное, гуморальное звенья и локальные тканевые барьеры [18, 19]. Субпопуляционный дисбаланс лимфоцитов (рост клеток CD16<sup>+</sup>56<sup>+</sup> и CD19<sup>+</sup>), вероятно, отражает активацию врожденного иммунитета и готовность к гуморальному ответу. Гиперпродукция специфических иммуноглобулинов IgG и IgE ( $R^2 = 0,37-0,86$ ) может свидетельствовать об индуцированной химической сенсибилизации, манифестирующей на уровне гистематических барьеров респираторного тракта в виде местной эозинофильной реакции.

Важным результатом исследования является демонстрация возможной половой дифференциации патогенеза. У девочек вектор негативного отклика, по-видимому, смещен в сторону системного иммунного ответа и дисбаланса нейроэндокринной регуляции. Установленное постепенное угнетение тиреоидного статуса (снижение уровня свободного Т4), сопряженное вовлечение серотонинергической трансмиссии и персистирующего подъема кортизола позволяют предположить их последующую манифестацию в форме расстройств вегетативной нервной системы и нейроэндокринных перестроек. Подобная уязвимость эндокринной оси у лиц женского пола полностью согласуется с концепцией нейроэндокринной восприимчивости к металлам (в том числе к хрому и марганцу), которые способны

выступать в роли металлэстрогенов и, вероятно, прерывать центральные регуляторные сигналы на уровне гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной оси [20]. Вполне допустимо, что вторичным следствием регуляторного сдвига становится усугубление патологии костной системы (дорсопатии и вальгусные деформации) [21]. Зафиксированное только у девочек угнетение эритропоэза (снижение числа эритроцитов, их объема и цветного показателя) может указывать на высокую чувствительность женской гемопоетической системы к действию хрома и меди, усугубляемую физиологически детерминированным эстрогеновым фоном [22].

У мальчиков отклик реализуется, вероятно, в основном через быстрое истощение эндогенной антиоксидантной защиты и манифестацию клеточного цитолиза, что может привести к выраженной деструкции клеточных барьеров и специфическому повреждению органов-мишеней. Свободнорадикальное повреждение нейронов (рост НСЕ) ассоциировано, по всей видимости, с задержкой речевого развития у мальчиков, что может объясняться меньшей стабильностью гематоэнцефалического барьера в препубертатный период и высокой уязвимостью развивающихся структур мозга к действию марганца и алюминия [23]. Деформация липидного обмена (снижение ЛПВП и сопряженный рост триглицеридов), предположительно, выступает предвестником жировой дегенерации печени вследствие возможного блокирования митохондриального  $\beta$ -окисления жирных кислот в гепатоцитах [24]. Прямое повреждающее действие алюминия и марганца на остеобласты на фоне истощенного антиоксидантного пула способно привести к сколиозу и плоской стопе, что, вероятно, связано с более высокими темпами скелетного роста у мальчиков [25].

**Ограничения исследования.** К основным ограничениям настоящей работы относятся ретроспективный характер исследования и фокус исключительно на детской когорте 4–7 лет, что не позволяет выполнить прямую экстраполяцию выводов на более старшие возрастные группы. Модели учитывали ингаляционный путь поступления металлов. Оценка сопутствующего вклада алиментарного и перкутанного путей требует уточнения в последующих проспективных исследованиях.

## Заключение

Результаты каскадного моделирования верифицировали роль ингаляционного пути поступления металлов, при этом биомаркеры экспозиции четко отражают специфику состава выбросов конкретных территорий. Установлены реперные концентрации в крови хрома (0,0011 мг/дм<sup>3</sup>), марганца (0,011 мг/дм<sup>3</sup>), никеля (0,002 мг/дм<sup>3</sup>), меди (0,912 мг/дм<sup>3</sup>), а в моче — алюминия (0,0032 мг/дм<sup>3</sup>), превышение которых инициирует развитие негативных эффектов у детей. Обоснован единый профиль донозологических биомаркеров негативных эффектов, включающий показатели оксидативного стресса, митохондриального апоптоза, клеточного и гуморального иммунитета, а также критерии состояния барьерных тканей. Выявлена выраженная дифференциация траекторий патогенеза у девочек и мальчиков. У девочек преобладает дисрегуляторный (нейроэндокринный) сценарий, характеризующийся угнетением тиреоидного статуса и вегетативными расстройствами. У мальчиков реализуется цитотоксический тип повреждения с истощением антиоксидантной защиты, вызывающий когнитивно-речевые расстройства, жировую дегенерацию печени, а также прямое угнетение остеобластов, манифестирующее сколиозом и плоскостопием в период интенсивного скелетного роста. Полученные количественные параметры причинно-следственных связей служат доказательной базой для санитарно-гигиенических оценок с целью предотвращения негативного влияния химического фактора среды обитания на здоровье населения. Установленные особенности патогенеза с учетом половых различий дают возможность существенно повысить адресность и эффективность программ профилактики детей в условиях аэрогенного воздействия металлов.

## Литература

(п.п. 3–16, 18–25 см. References)

1. Тихонова И.В., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Пескова Е.В., Игнатова А.М. Гигиеническая оценка аэрогенного воздействия взвешенных веществ на заболеваемость детей болезнями органов дыхания в зоне влияния источников выбросов металлургического производства. *Анализ риска здоровью*. 2020; 3: 61–9. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/anuqda>
2. Кольдибекова Ю.В., Землянова М.А., Горяев Д.В., Четверкина К.В. Показатели заболеваемости детского населения в условиях аэрогенной химической экспозиции: факторы риска и ассоциативные связи. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2023; 67(6): 535–42. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2023-67-6-535-542> <https://elibrary.ru/nzyiex>
17. Наквасина М.А., Артюхов В.Г., Свекло Л.С. Механизмы гибели лимфоцитов человека, индуцированной УФ-излучением и активными формами кислорода. *Вестник ВГУ. Серия: биология, фармация*. 2023; 1: 61–74. <https://elibrary.ru/ipqies>

## References

1. Tikhonova I.V., Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V., Peskova E.V., Ignatova A.M. Hygienic assessment of aerogenic exposure to particulate matter and its impacts on morbidity with respiratory diseases among children living in a zone influenced by emissions from metallurgic production. *Health Risk Analysis*. 2020; 3: 61–9. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/anuqda> (in Russian)
2. Koldibekova Yu.V., Zemlyanova M.A., Goryaev D.V., Chetverkina K.V. Morbidity rates of the children population under conditions of aerogenic chemical exposure: risk factors and associations. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii (Health Care of the Russian Federation, Russian journal)*. 2023; 67(6): 535–42. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2023-67-6-535-542> <https://elibrary.ru/nzyiex> (in Russian)
3. Lv D., Tang H., Zhou L. Impact of air pollution on metabolic dysfunction-associated fatty liver disease. *Int. J. Mol. Sci.* 2026; 27(12): 5168. <https://doi.org/10.3390/ijms27125168>
4. Chen M., Du R., Zhang T., Li C., Bao W., Xin F., et al. The application of a physiologically based toxicokinetic model in health risk assessment. *Toxics*. 2023; 11(10): 874. <https://doi.org/10.3390/toxics11100874> <https://elibrary.ru/dbvgxn>
5. Rechtman E., Reichenberg A., Invernizzi A., Fleysher L., Rebello V., Oluyemi K., et al. Fetal and postnatal metal metabolism-related changes in brain function are associated with childhood behavioral deficits. *Sci. Adv.* 2026; 12(17): eadz1340. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adz1340> <https://elibrary.ru/ptenld>
6. Genchi G., Carocci A., Lauria G., Sinicropi M.S., Catalano A. Nickel: human health and environmental toxicology. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17(3): 679. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679> <https://elibrary.ru/vhfucs>
7. Reale E., Zare Jeddi M., Paini A., Connolly A., Duca R., Cubadda F., et al. Human biomonitoring and toxicokinetics as key building blocks for next generation risk assessment. *Environ. Int.* 2024; 184: 108474. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108474> <https://elibrary.ru/gtchrm>
8. Sharma B.M., Komprdová K., Lörcincová K., Kuta J., Příbylová P., Scheringer M., et al. Human biomonitoring of essential and toxic trace elements (heavy metals and metalloids) in urine of children, teenagers, and young adults from a Central European cohort in the Czech Republic. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2025; 35(5): 730–45. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00724-4> <https://elibrary.ru/acglit>
9. Romano R., Sgrulletti M., Cortesi M., Mantuano G., Moschese V. Environmental determinants of child health: present challenges and future outlook. *Global Pediatrics*. 2026; 17: 100358. <https://doi.org/10.1016/j.gped.2026.100358>
10. Olsen A.K., Li D., Li L. Explore the dosimetric relationship between the intake of chemical contaminants and their occurrence in blood and urine. *Environ. Sci. Technol.* 2023; 57(26): 9526–37. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08470> <https://elibrary.ru/wmjllhu>
11. Gonzalez-Villalva A., Rojas-Lemus M., López-Valdez N., Cervantes-Valencia M.E., Guerrero-Palomo G., Casarubias-Tabarez B., et al. Metal pollution in the air and its effects on vulnerable populations: a narrative review. *Int. J. Mol. Sci.* 2026; 27(2): 720. <https://doi.org/10.3390/ijms27020720> <https://elibrary.ru/uypmtp>
12. Poddalgoda D., Hays S.M., Kirman C., Chander N., Nong A. Derivation of biomonitoring equivalents for aluminium for the interpretation of population-level biomonitoring data. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2021; 122: 104913. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104913> <https://elibrary.ru/fagnlz>
13. Long C., Su Z., Hu G., Zhang Q., Zhang Y., Chen T., et al. Potential mechanisms of lung injury and repair after hexavalent chromium [Cr(VI)] aerosol whole-body dynamic exposure. *Chemosphere*. 2024; 349: 140918. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140918> <https://elibrary.ru/lpqfbo>
14. Rahimzadeh M.R., Kazemi S., Amiri R.J., Pirzadeh M., Moghadamnia A.A. Aluminum poisoning with emphasis on its mechanism and treatment of intoxication. *Emerg. Med. Int.* 2022; 1480553. <https://doi.org/10.1155/2022/1480553> <https://elibrary.ru/aqwjye>
15. Wang K., Ning X., Qin C., Wang J., Yan W., Zhou X., et al. Respiratory exposure to copper oxide particles causes multiple organ injuries via oxidative stress in a rat model. *Int. J. Nanomedicine*. 2022; 17: 4481–96. <https://doi.org/10.2147/IJN.S378727> <https://elibrary.ru/jzboaj>
16. Garcia-Caballero C.A., Ordoñez-Librado J.L., De Alba-Ríos A., Montiel-Flores E., Aparicio-Trejo O.E., García-Arroyo F., et al. Mitochondrial ultrastructure, fission proteins, activity, and motor dysfunctions in the innovative Parkinson's disease model induced by manganese inhalation. *Toxics*. 2026; 14(3): 208. <https://doi.org/10.3390/toxics14030208> <https://elibrary.ru/akytvs>
17. Nakvasina M.A., Artyukhov V.G., Sveklo L.S. Mechanisms of human lymphocyte death induced by UV radiation and reactive oxygen species. *Vestnik VGU. Seriya: biologiya, farmatsiya*. 2023; 1: 61–74. <https://elibrary.ru/ipqies> (in Russian)
18. Shah R., Ibis B., Kashyap M., Boussiotis V.A. The role of ROS in tumor infiltrating immune cells and cancer immunotherapy. *Metabolism*. 2024; 151: 155747. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2023.155747> <https://elibrary.ru/pjppguq>
19. Yu T., Yu Y., Ma Y., Chen G. Inhibition of CREB promotes glucocorticoids action on airway inflammation in pediatric asthma by promoting ferroptosis of eosinophils. *Allergol. Immunopathol. (Madr.)* 2023; 51(4): 164–74. <https://doi.org/10.15586/aei.v51i4.873> <https://elibrary.ru/dwkvbi>
20. Mei Y., Liu J., Dong Z., Ke S., Su W., Luo Z., et al. Heavy metals exposure and HPG-axis related hormones in women across the lifespan: an integrative epidemiological and bioinformatic perspective. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2025; 303: 118962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118962> <https://elibrary.ru/fopwlu>
21. Rembacz K.P., Sawicka E., Długosz A. Role of estradiol in chromium-induced oxidative stress. *Acta Pol. Pharm.* 2012; 69(6): 1372–9.
22. Huang C.-H., Wang C.-W., Chen H.-C., Tu H.-P., Chen S.-C., Hung C.-H., et al. Gender difference in the associations among heavy metals with red blood cell hemogram. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; 19(1): 189. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010189> <https://elibrary.ru/igcpib>
23. Mi X., Ye Z.L., Zhang X.J., Chen X.C., Dai X.M. Sex- and age-differences in the expression of critical blood-brain barrier regulators: a physiological context. *Biol. Sex Differ.* 2025; 16(1): 67. <https://doi.org/10.1186/s13293-025-00751-2> <https://elibrary.ru/qjvixf>
24. Yim G., Margetaki K., Romano M.E. Metal mixture exposures and serum lipid levels in childhood: the Rhea mother-child cohort in Greece. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2024; 34: 688–98. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00674-x> <https://elibrary.ru/fbyzyf>
25. Taskozhina G., Batyrova G., Umarova G., Issanguzhina Z., Kereyeva N. The manganese-bone connection: investigating the role of manganese in bone health. *J. Clin. Med.* 2024; 13(16): 4679. <https://doi.org/10.3390/jcm13164679> <https://elibrary.ru/qjgccl>

## Сведения об авторах

**Зайцева Нина Владимировна**, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: znv@fcrisk.ru

**Кольдибекова Юлия Вячеславовна**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. с выполнением обязанностей зав. лаб. метаболизма и фармакокинетики отд. биохимических и цитогенетических методов диагностики ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: koldibekova@fcrisk.ru

**Землянова Марина Александровна**, доктор мед. наук, профессор, зав. отд. биохимических и цитогенетических методов диагностики ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН» Роспотребнадзора, 614045, Пермь, Россия. E-mail: zem@fcrisk.ru

## About the authors

**Nina V. Zaitseva**, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, scientific director, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145> E-mail: znv@fcrisk.ru

**Yuliya V. Koldibekova**, PhD (Biology), senior researcher, head, Laboratory of metabolism and pharmacokinetics, Biochemical and Cytogenetic Diagnostic Techniques Department, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3924-4526> E-mail: koldibekova@fcrisk.ru

**Marina A. Zemlyanova**, DSc (Medicine), professor, head, Biochemical and Cytogenetic Diagnostic Techniques Department, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8013-9613> E-mail: zem@fcrisk.ru

Кучма В.Р.<sup>1,2</sup>, Поленова М.А.<sup>1</sup>, Седова А.С.<sup>1</sup>, Вирабова А.Р.<sup>2</sup>

## Гигиеническая оценка напряжённости образовательной деятельности обучающихся на уроке

<sup>1</sup>ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия;<sup>2</sup>ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Увеличение объёма информации в условиях современной школы, в том числе связанное с развитием информационно-коммуникационных технологий, высокая вероятность учебного переутомления обучающихся, повышенный риск формирования школьно-обусловленных состояний и болезней актуализируют необходимость объективной гигиенической оценки, контроля и мониторинга напряжённости учебной деятельности.

**Материалы и методы.** Хронометражные наблюдения в течение одной учебной недели за обучающимися 10–11-х классов по видеозаписи 58 уроков по основным учебным дисциплинам за исключением уроков физической культуры и основ безопасности жизнедеятельности.

**Результаты.** Выделены гигиенически значимые для оценки утомительности виды учебной деятельности на уроке, дана характеристика интеллектуальных, информационных, эмоциональных нагрузок, монотонности нагрузок и режима работы обучающихся в процессе учебных занятий. Установлено, что напряжённость учебного процесса во многом определяется интеллектуальными нагрузками старшеклассников. О достаточно высокой напряжённости интеллектуальной деятельности обучающихся на уроке свидетельствуют высокая плотность урока и сосредоточение внимания учеников на учебной работе, частая смена видов учебной деятельности, использование различных средств обучения, в том числе одновременно, преобладание видов учебной работы высокой степени сложности с учётом алгоритма её выполнения.

**Ограничения исследования.** Исследование ограничено выборкой показателей, характеризующих организацию образовательной деятельности обучающихся на уроке на этапе среднего общего образования, что не позволяет в полной мере экстраполировать полученные данные на этапы начального общего и основного общего образования.

**Заключение.** Для объективной оценки учебных нагрузок и напряжённости образовательной деятельности обучающихся необходимо учитывать сложность учебных заданий и ограниченность их выполнения во времени, монотонность учебной работы, используемые средства обучения, наличие двигательного компонента и характеристику эмоционального фона. Эти показатели могут и должны оцениваться с гигиенических позиций в процессе гигиенического наблюдения (в том числе хронометражного) и в последующем нормироваться, что актуализирует необходимость разработки методики измерения и гигиенической оценки всего комплекса показателей напряжённости образовательной деятельности обучающихся разного возраста.

**Ключевые слова:** гигиена обучения; учебная деятельность; учебные нагрузки; интенсификация обучения; оценка урока; напряжённость учебной деятельности

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование выполнено с соблюдением принципов Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации в действующей редакции (WMA Declaration of Helsinki — Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects). Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (протокол № 5 от 30 июня 2026 г.). Все участники и их законные представители дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Кучма В.Р., Поленова М.А., Седова А.С., Вирабова А.Р. Гигиеническая оценка напряжённости образовательной деятельности обучающихся на уроке. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1020–1026. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1020-1026> <https://elibrary.ru/jyiybj>

**Для корреспонденции:** Поленова Марина Альбертовна, e-mail: polenova.ma@fncg.ru

**Вклад авторов:** Кучма В.Р., Вирабова А.Р. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Поленова М.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, анализ данных исследования, написание текста, редактирование; Седова А.С. — концепция и дизайн исследования, анализ данных исследования, написание текста, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Благодарность.** Выражаем благодарность и признательность Степановой Марине Исааковне, доктору мед. наук, профессору, гл. науч. сотр. отд. гигиены детей, подростков и молодежи Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора за участие в обсуждении на этапе планирования исследования и консультациях на этапе анализа данных.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 01.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Vladislav R. Kuchma<sup>1,2</sup>, Marina A. Polenova<sup>1</sup>, Anna S. Sedova<sup>1</sup>, Anna R. Virabova<sup>2</sup>

## Hygienic assessment of the intensity of educational activities of students in the lesson

<sup>1</sup>Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation;<sup>2</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The increasing volume of information in modern schools, including the development of information and communication technologies, the high likelihood of students developing academic fatigue, and the increased risk of developing school-related conditions and diseases, necessitate an objective hygienic assessment, control, and monitoring of the intensity of academic activities.

**Materials and methods.** Time-lapse observations in students in grades 10 and 11 based on video recordings of fifty eight lessons in the main subjects, excluding physical education and life safety classes, during one school week.

**Results.** The article identifies the types of educational activities that are hygienically significant for assessing the exhaustion in students during lessons, and provides a description of the intellectual, informational, and emotional loads, as well as the monotony of the loads and the working conditions in students during lessons. The article also establishes the intensity of the educational process to be largely determined by the intellectual loads in high school students. The high density of the lesson and the students' focus on their academic work, as well as the frequent changes in the types of educational activities, the use of various teaching tools, including simultaneous use, and the prevalence of high-level educational activities with complex algorithms, indicate to a relatively high level of intellectual activity among students during lessons.

**Limitations.** The study is limited to a sample of indicators that characterize the management of educational activities for students at the secondary general education stage, which does not allow for full extrapolation of the obtained data to the primary general and secondary general education stages.

**Conclusion.** To objectively assess the academic workload and intensity of educational activities it is necessary to take into account the complexity of academic tasks and the limited time available for their completion, as well as the monotony of academic work, the use of teaching tools, the presence of a physical component, and the characteristics of the emotional background. These indicators can and should be evaluated from a hygienic perspective during hygienic monitoring (including time-keeping) and subsequently standardized, which highlights the need to develop a methodology for measuring and hygienically assessing the entire range of indicators related to the intensity of educational activities among students of different ages.

**Keywords:** hygiene of learning; educational activities; educational loads; intensification of education; lesson evaluation; intensity of educational activities

**Compliance with ethical standards.** The study was conducted in compliance with the principles of the Helsinki Declaration of the World Medical Association in its current version (WMA Declaration of Helsinki — Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects). The study was approved by the local Ethics committee of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman (minutes of meeting No 5 dated of 6/30/2026). All participants and their legal representatives gave informed voluntary written consent to participate in the study.

**For citation:** Kuchma V.R., Polenova M.A., Sedova A.S., Virabova A.R. Hygienic assessment of the intensity of educational activities of students in the lesson. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1020–1026. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1020-1026> <https://elibrary.ru/jyiybj> (In Russ.)

**For correspondence:** Marina A. Polenova, e-mail: polenova.ma@fncg.ru

**Contribution:** Kuchma V.R., Virabova A.R. — the concept and design of the study, editing; Polenova M.A. — concept and design of the study, collection and processing of material, analyzing research data, writing text, editing; Sedova A.S. — the concept and design of the study, analyzing research data, writing text, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Acknowledgments.** We express our gratitude and appreciation to our colleague Marina I. Stepanova, DSc (Medicine), professor, chief researcher, Department of Hygiene of Children, Adolescents, and Youth (Institute of Comprehensive Hygiene Problems, Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman for her participation in discussions during the study planning stage and for her consultations during the data analysis stage.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: June 1, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Для современного образования в России характерны повышение объёма образовательной нагрузки, перегруженность школьных программ, интенсификация и цифровизация образовательного процесса, большое количество контрольных и проверочных работ [1, 2]. В сложившихся условиях высокая вероятность развития учебного утомления обучающихся, повышенный риск формирования школьно-обусловленных состояний и заболеваний свидетельствуют о необходимости объективной гигиенической оценки, контроля и мониторинга характера учебной деятельности [3–5].

В настоящее время гигиеническая регламентация урока включает продолжительность и плотность урока, количество видов учебной деятельности на уроке и их продолжительность, продолжительность использования электронных средств обучения (ЭСО), наличие перерывов для проведения физкультурных минуток и (или) гимнастики для глаз<sup>1,2</sup>.

Методика оценки напряжённости учебного труда обучающихся в школе, предусматривающая оценку интеллектуальной, сенсорной, эмоциональной нагрузки, монотонности и режима работы [6], объективизирует характеристику напряжённости учебной деятельности детей и подростков в условиях организации обучения на углублённом уровне, профильного обучения, традиционного и дистанционного форматов обучения, в городских и сельских школах [3, 7–10].

Введение федеральных образовательных программ на уровне общего образования и коррекция содержания учебных предметов актуализируют совершенствование гигиенической оценки образовательного процесса, в том числе в рамках отдельного урока, в течение которого обуча-

ющиеся могут выполнять различные виды учебной деятельности, решать задачи разного уровня сложности на родном либо иностранном языке, использовать разное количество печатных и электронных средств обучения.

*Цель исследования* — гигиеническая оценка организации и напряжённости образовательной деятельности обучающихся на уроке.

## Материалы и методы

Проведены хронометражные наблюдения за обучающимися 10–11-х классов с последующим анализом структуры и содержания уроков, видов учебной деятельности, используемых средств обучения. Хронометражные наблюдения проводились по видеозаписи уроков в течение одной учебной недели. В исследование были включены 58 уроков по основным учебным дисциплинам за исключением уроков физической культуры и основ безопасности жизнедеятельности.

Для оценки напряжённости образовательной деятельности обучающихся в школе использовали показатели интеллектуальных, информационных (сенсорных), эмоциональных нагрузок, монотонности и режима учебной деятельности.

В число оцениваемых показателей были включены:

- по интеллектуальным нагрузкам: количество и частота смен видов учебной деятельности, их продолжительность; плотность урока; продолжительность сосредоточенного внимания учеников при выполнении учебных действий; тип, количество и продолжительность использования средств обучения; сложность учебной работы в зависимости от алгоритма её выполнения; сложность учебной работы с учётом времени, отведённого на её выполнение, и ответственности за конечный результат;
- по информационным (сенсорным) нагрузкам: продолжительность и комфортность восприятия визуальной и звуковой информации при использовании видеоматериалов и аудиозаписи на уроке; продолжительность восприятия звуковой информации при использовании наушников;
- по монотонности нагрузок: продолжительность монотонной учебной обстановки (пассивного наблюдения учеников за ходом урока); монотонной учебной деятельности (однообразных, повторяющихся учебных действий, не требующих пристального внимания, переработки информации и принятия решения учениками) и интерактивность учебной деятельности (интерактивных форм

<sup>1</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2020 г. № 28 (ред. от 24.12.2025 г.) «Об утверждении санитарных правил СП 2.4.3648–20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодёжи» (вместе с СП 2.4.3648–20 «Санитарные правила...») (зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 г. № 61573).

<sup>2</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 (ред. от 24.12.2025 г.) «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместе с СанПиН 1.2.3685–21 «Санитарные правила и нормы...») (зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 г. № 62296) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026 г.).

обучения, организуемых педагогом с целью повышения мотивации обучающихся к коллективной работе и достижению результатов);

- *по эмоциональным нагрузкам*: стиль преподавания; эмоциональный фон на уроке; наличие и продолжительность эмоциональных разрядок на уроке (специальных приёмов, организуемых педагогом с дидактической целью и для снятия эмоционального напряжения учеников); наличие конфликтных ситуаций на уроке;
- *по режиму учебной деятельности*: наличие, содержание и продолжительность физкультминуток на уроке; организация двигательной активности на уроке (двигательно-активный урок) и режима смены поз «стоя—сидя».

## Результаты

Гигиеническое наблюдение и хронометражные исследования позволили идентифицировать 24 вида учебной деятельности обучающихся, из числа которых выделены 13 основных: прослушивание; обсуждение учебного материала; решение задач, тестовых заданий устно или письменно; ответы на вопросы; запись в тетради; чтение; просмотр видеозаписи, презентации; проверка выполнения заданий; игровые действия по формированию навыков речи на иностранном языке; повторение учебного материала; перевод учебного материала; рассказ небольшого текста на иностранном языке; контрольно-проверочные работы (табл. 1).

На большинстве учебных занятий преимущественно использовались следующие виды учебной работы обучающихся: прослушивание учебного материала (82,8% уроков) и его обсуждение (81% уроков), решение задач, тестовых заданий (62,1% уроков). Реже регистрировались учебные действия, связанные с ответами на вопросы (46,6% уроков), записью в тетради (37,9% уроков), чтением (27,6% уроков), просмотром видеозаписей или презентаций (24,1% уроков), проверкой выполнения заданий (15,5% уроков) и игровыми действиями по формированию навыков использования иностранного языка (8,6% уроков). Частота встречаемости на занятиях других видов учебной работы обучающихся (повторение или перевод учебного материала; рассказ небольшого текста на иностранном языке; контрольно-проверочные работы) составляла не более 5,2%.

По продолжительности преобладали такие виды учебной деятельности, как прослушивание (38,4% от времени уроков за неделю), в основном за счёт прослушивания объяснений учителя (28,6% от времени уроков), а также решение задач, тестовых заданий (29,6% от времени уроков) и обсуждение учебного материала (26,5% от времени уроков). Ответам на вопросы, записям в тетрадях и чтению было отведено соответственно 11,5; 11,3 и 8,7% времени уроков, доля контрольно-проверочных работ составила 4,8%. Остальные виды учебной работы занимали менее 2,1% времени уроков за неделю.

Практически на всех уроках на протяжении занятия отмечалась периодическая сменяемость видов учебных действий. В среднем за урок количество видов учебной деятельности составило 4,2, частота их сменяемости — 7,6 раза. В ходе большинства учебных занятий фиксировались виды учебной деятельности, непрерывная продолжительность которых составляла более 10 мин.

Следует отметить, что лишь четверть учебных занятий (25,9%) имела плотность урока в пределах 70–90%, что соответствовало гигиеническим нормативам, тогда как в большинстве случаев (69% уроков) отмечались высокие показатели плотности — более 90%, а плотность каждого пятого урока (19%) достигала 100%.

На большинстве оцениваемых уроков средняя продолжительность сосредоточенного внимания обучающихся составила 80,9% от времени урока. На половине учебных занятий фиксировались отвлечения от учебного процесса, продолжительность которых в среднем составила 13% от времени урока.

Важным компонентом учебного процесса было использование различных средств обучения, в том числе электронных, которые могли оказывать влияние на напряжённость образовательного процесса на уроке. Установлено, что на протяжении учебной недели практически на всех уроках (56 уроков; 96,5%) и в течение 73,6% времени уроков использовались различные средства обучения: коллективные (учебная доска меловая либо маркерная, натяжной экран с мультимедийным проектором и интерактивная доска) и индивидуальные (учебник, учебные пособия, тетрадь, дополнительный раздаточный материал и ноутбук). При этом печатные средства обучения применялись в течение 61,6% учебного времени, ЭСО — 16,1% времени (коллективные ЭСО — 15,7%, индивидуальные ЭСО — 1,8%).

В зависимости от решаемых задач на уроке применяли от одного до пяти средств обучения. В большинстве случаев (88% уроков) практически половину учебного времени (47,1%) старшеклассники одновременно использовали одно средство обучения, тогда как на части учебных занятий (53,4% уроков) в течение 24,5% времени использовались два средства обучения. Следует отметить, что режим использования ЭСО (продолжительность и одновременность использования) соответствовал гигиеническим нормативам.

Установлено, что в структуре большинства уроков преобладали виды деятельности 3-й степени сложности, когда задания выполнялись учениками по алгоритму, выбранному ими самостоятельно с учётом ранее полученных знаний (табл. 2). Продолжительность выполнения таких заданий составила 61,3% от времени уроков. Учебная работа 1-й степени сложности, когда от учеников не требовалось принятия самостоятельного решения, заняла 14,4% времени; 2-й степени сложности, при выполнении заданий по инструкции или алгоритму, предложенному педагогом, — 13,1% времени. Лишь на одном уроке обучающиеся выполняли задания 4-й степени сложности, требующие творческого подхода (написание сочинения); время их выполнения составило 1,7% от всего учебного времени за неделю.

По характеру учебной деятельности с учётом ограничения времени на её выполнение наибольшую продолжительность (73,9% учебного времени за неделю) имели задания, которые обучающиеся выполняли в свободном темпе (табл. 3). Менее продолжительными были задания, выполнявшиеся в условиях как ограничения, так и дефицита во времени (16,4% времени за неделю). Самые сложные задания, которые выполнялись в условиях дефицита времени и повышенной ответственности за конечный результат, заняли десятую часть от всего учебного времени за неделю (11,4% учебного времени за неделю).

Установлено, что демонстрация видеоматериалов применялась лишь на 8,6% уроков, а аудиозапись — на 19% уроков, при этом продолжительность просмотра видеозаписи составила не более 1,4% учебного времени, прослушивание аудиозаписи — 4,4% времени. Случаев некомфортного восприятия обучающимися зрительной информации при просмотре видеозаписи и слуховой информации при прослушивании аудио- и видеозаписей зафиксировано не было. Наушники на уроках не использовались.

Монотонный характер учебной обстановки отмечался на 3,5% уроков, монотонность учебной деятельности — на 5,2% уроков. Продолжительность пассивного наблюдения учениками за ходом урока составила 2,2% учебного времени, а однообразных учебных действий, не требующих пристального внимания, переработки информации и принятия решения учениками, — 2,3% учебного времени. Интерактивный характер учебной деятельности, направленный на активное вовлечение обучающихся в ход урока, отмечался на 12% уроков, что в среднем составило 3,1% учебного времени.

Оценка эмоциональных нагрузок показала, что большинство уроков отличал демократический стиль преподавания (88% уроков) и благоприятный эмоциональный фон (91,4% урока). Вместе с тем для небольшой части уроков

Таблица 1 / Table 1

**Виды учебной деятельности на уроках в 10–11-х классах в течение одной учебной недели****Kinds of educational activities in 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> classes during one academic week**

| Виды учебной деятельности<br>Types of educational activities                                                                                                                                                                               | Количество уроков<br>Number of lessons<br><i>n</i> = 58 |      | Продолжительность видов учебной<br>деятельности за учебную неделю<br>Duration of kinds of educational activities<br>per academic week |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                            | абс.<br>abs.                                            | %    | мин<br>minutes                                                                                                                        | %    |
| Прослушивание, в том числе:   Listening, including:                                                                                                                                                                                        | 48                                                      | 82.8 | 892                                                                                                                                   | 38.4 |
| объяснения учителя   teacher's explanations                                                                                                                                                                                                | 45                                                      | 77.6 | 663                                                                                                                                   | 28.6 |
| рассказа, доклада, др. на русском языке   story, report, etc. in Russian                                                                                                                                                                   | 7                                                       | 12.0 | 113                                                                                                                                   | 4.9  |
| рассказа, доклада, др. на иностранном языке   story, report, etc. in a foreign language                                                                                                                                                    | 1                                                       | 1.7  | 15                                                                                                                                    | 0.64 |
| аудиозаписи на русском языке   audio recordings in Russian                                                                                                                                                                                 | 6                                                       | 10.3 | 20                                                                                                                                    | 0.9  |
| аудиозаписи на иностранном языке   audio recordings in foreign languages                                                                                                                                                                   | 8                                                       | 13.8 | 81                                                                                                                                    | 3.5  |
| Обсуждение учебного материала   Discussion of educational material                                                                                                                                                                         | 47                                                      | 81.0 | 615                                                                                                                                   | 26.5 |
| Решение задач, тестовых заданий и др. устно/письменно (в тетради, на персональном компьютере, ноутбуке, планшете)<br>Solving problems, tests, and other tasks orally/in writing (in a notebook, on a personal computer, laptop, or tablet) | 36                                                      | 62.1 | 686                                                                                                                                   | 29.6 |
| Ответы на вопросы   Answers to questions                                                                                                                                                                                                   | 27                                                      | 46.6 | 267                                                                                                                                   | 11.5 |
| Запись в тетради, в том числе:   Notebook entry, including:                                                                                                                                                                                | 22                                                      | 37.9 | 260                                                                                                                                   | 11.3 |
| на русском языке   in Russian                                                                                                                                                                                                              | 18                                                      | 31.0 | 231                                                                                                                                   | 10.0 |
| на иностранном языке   in a foreign language                                                                                                                                                                                               | 4                                                       | 6.9  | 29                                                                                                                                    | 1.3  |
| Чтение, в том числе:   Reading, including:                                                                                                                                                                                                 | 16                                                      | 27.6 | 202                                                                                                                                   | 8.7  |
| на русском языке   in Russian                                                                                                                                                                                                              | 6                                                       | 10.3 | 64                                                                                                                                    | 2.8  |
| на иностранном языке   in a foreign language                                                                                                                                                                                               | 10                                                      | 17.2 | 138                                                                                                                                   | 5.9  |
| Просмотр, в том числе:   Viewing, including:                                                                                                                                                                                               | 14                                                      | 24.1 | 33                                                                                                                                    | 1.4  |
| видеозаписи на русском языке   videos in Russian                                                                                                                                                                                           | 4                                                       | 6.9  | 31                                                                                                                                    | 1.3  |
| видеозаписи на иностранном языке   videos in a foreign language                                                                                                                                                                            | 1                                                       | 1.7  | 2                                                                                                                                     | 0.1  |
| презентации на русском языке на экране коллективного электронного средства обучения<br>presentations in Russian on the screen of a collective electronic learning tool                                                                     | 13                                                      | 22.4 | 257                                                                                                                                   | 11.1 |
| презентации на иностранном языке на экране коллективного электронного средства обучения<br>presentations in a foreign language on the screen of a collective electronic learning tool                                                      | 1                                                       | 1.7  | 3                                                                                                                                     | 0.1  |
| Проверка выполнения заданий (задача, тестовое задание и др.)<br>Checking the completion of tasks (problem, test task, etc.)                                                                                                                | 9                                                       | 15.5 | 48                                                                                                                                    | 2.1  |
| Игровые действия по формированию навыков речи на иностранном языке<br>Game activities for developing foreign language speaking skills                                                                                                      | 5                                                       | 8.6  | 15                                                                                                                                    | 0.6  |
| Повторение учебного материала   Repetition of educational material                                                                                                                                                                         | 3                                                       | 5.2  | 6                                                                                                                                     | 0.3  |
| Перевод учебного материала   Translation of educational material                                                                                                                                                                           | 3                                                       | 5.2  | 26                                                                                                                                    | 1.1  |
| Рассказ небольшого текста (топик) на иностранном языке<br>A short text (topic) in a foreign language                                                                                                                                       | 3                                                       | 5.2  | 15                                                                                                                                    | 0.6  |
| Контрольно-проверочные работы:   Control and verification work:                                                                                                                                                                            | 3                                                       | 5.1  | 113                                                                                                                                   | 4.8  |
| выполнение контрольной работы   completing the control work                                                                                                                                                                                | 2                                                       | 3.4  | 73                                                                                                                                    | 3.1  |
| написание сочинения   writing an essay                                                                                                                                                                                                     | 1                                                       | 1.7  | 40                                                                                                                                    | 1.7  |

были характерны индифферентный или псевдодемократический стиль преподавания и нейтральный эмоциональный фон (по 5,2% уроков) либо авторитарный или смешанный стиль преподавания и неблагоприятный эмоциональный фон (по 3,4% уроков). Эмоциональные разрядки проводились на 12% уроков (в среднем за урок не более 4 мин; 10% от времени урока). Конфликтных ситуаций на учебных занятиях в 10–11-х классах зафиксировано не было.

Оценка режима учебной деятельности старшеклассников показала, что физкультминутки проводились лишь на трёх уроках (5,2%), их продолжительность составляла 1–2 мин, а гимнастика для глаз не проводилась. При характеристике двигательного компонента следует отметить, что организация двигательной активности (двигательно-активный урок) и режима смены поз стоя и сидя [11] в структуре уроков для обучающихся 10–11-х классов не предусматривалась.

Таблица 2 / Table 2

**Виды сложности работы на уроках в 10–11-х классах в течение учебной недели**  
**Kinds of educational activities based on the difficulty of work in 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> grades during the school week**

| Степень сложности учебной деятельности<br>The degree of complexity of educational activities                                                                                                                                                                                              | Количество уроков<br>Number of lessons<br><i>n</i> = 58 |      | Продолжительность видов учебной деятельности за учебную неделю<br>Duration of kinds of educational activities per academic week |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                           | абс.<br>abs.                                            | %    | мин<br>minutes                                                                                                                  | %    |
| 1-я Отсутствует необходимость принятия решения<br>1 <sup>st</sup> No need to make a decision                                                                                                                                                                                              | 47                                                      | 63.8 | 334                                                                                                                             | 14.4 |
| 2-я Выполнение заданий по инструкции или алгоритму, предложенному учителем<br>2 <sup>nd</sup> Completing tasks according to instructions or algorithms suggested by the teacher                                                                                                           | 30                                                      | 43.1 | 305                                                                                                                             | 13.1 |
| 3-я Выполнение заданий по алгоритму, выбранному учеником (с учётом ранее пройденного материала)<br>3 <sup>rd</sup> Completing tasks according to the algorithm chosen by the student (taking into account previously learned material)                                                    | 56                                                      | 96.6 | 1422                                                                                                                            | 61.3 |
| 4-я Выполнение заданий, требующих нестандартного решения, творческого подхода (проектная, творческая деятельность: сочинение)<br>4 <sup>th</sup> Completing tasks that require a non-standard solution and a creative approach (project work, creative activities, such as writing, etc.) | 1                                                       | 1.7  | 40                                                                                                                              | 1.7  |

Таблица 3 / Table 3

**Виды ограничения во времени выполнения заданий на уроках в 10–11-х классах в течение учебной недели**  
**Kinds of educational activities, taking into account the time limit for their implementation in 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> classes during the school week**

| Степень сложности учебной деятельности<br>The degree of complexity of educational activities                                                                                                                                                                                                             | Количество уроков<br>Number of lessons<br><i>n</i> = 58 |      | Продолжительность видов учебной деятельности за учебную неделю<br>Duration of kinds of educational activities per academic week |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | абс.<br>abs.                                            | %    | мин<br>minutes                                                                                                                  | %    |
| 1-я Выполнение заданий без ограничения времени<br>1 <sup>st</sup> Completion of tasks without time restrictions                                                                                                                                                                                          | 55                                                      | 94.8 | 1715                                                                                                                            | 73.9 |
| 2-я Выполнение заданий в условиях ограничения времени (с возможностью его коррекции по ходу учебной деятельности)<br>2 <sup>nd</sup> Completion of tasks under time constraints (with the possibility of correcting them during the learning process)                                                    | 12                                                      | 20.7 | 115                                                                                                                             | 5.0  |
| 3-я Выполнение заданий в условиях дефицита времени и повышенной ответственности за конечный результат (тестирование, проверочная или контрольная работы)<br>3 <sup>rd</sup> Completing tasks under time constraints and increased responsibility for the final result (testing, review, or control work) | 8                                                       | 13.8 | 264                                                                                                                             | 11.4 |

## Обсуждение

В современных условиях возрастает значение таких составляющих учебных нагрузок, как интеллектуальные, информационные, сенсорные и психоэмоциональные нагрузки, режим образовательной деятельности в динамике учебного дня и недели, которые определяют напряжённость образовательной деятельности обучающихся.

Гигиеническое наблюдение и хронометражные исследования, проведённые на уроках в 10–11-х классах в течение учебной недели, позволили выделить 13 гигиенически значимых видов учебной деятельности, среди которых по продолжительности преобладают прослушивание (34,4% времени за неделю, в том числе 28,6% — прослушивание объяснения учителя), решение задач, тестовых заданий (29,6% времени), обсуждение учебного материала (26,5% времени).

Установлено, что в процессе учебных занятий преобладали (61,3% учебного времени за неделю) напряжённые виды учебной деятельности (3-я степень сложности), к которым относятся задания, выполняемые учениками по алгоритму, выбранному ими самостоятельно с учётом ранее полученных знаний. На выполнение заданий, требующих нестандартного решения, творческого подхода (4-я степень слож-

ности), приходилось лишь 1,7% времени уроков. На менее сложные виды учебной деятельности, когда для учеников отсутствует необходимость принятия решения (1-я степень сложности), приходилось 14,4% времени уроков или задания выполнялись по алгоритму, предложенному педагогом (2-я степень сложности), — 13,1% времени уроков.

Установлено, что 73,9% учебного времени составляли учебные задания, которые выполнялись старшеклассниками без ограничения времени (1-я степень сложности), что оценивается как допустимая напряжённость. В течение 11,4% учебного времени задания выполнялись в условиях дефицита времени и повышенной ответственности за конечный результат (3-я степень сложности), что рассматривается как напряжённая деятельность, которая должна быть регламентирована по продолжительности.

Зафиксировано превышение норматива плотности уроков (более 90%) на 69% уроков, что в сочетании с сосредоточенностью обучающихся на учебных действиях (более 80% от времени урока) свидетельствует об интенсификации учебной деятельности в процессе большинства занятий. Высокая плотность уроков наряду с выявленной частотой смен видов учебной деятельности (более 7 смен в среднем за урок) позволяет судить о значимом риске развития учеб-

ного утомления обучающихся и увеличения напряжённости учебных занятий [12].

При анализе использования на уроках в 10–11-х классах средств обучения также установлено, что более половины учебного времени (73,6%) учебная деятельность сопровождалась применением различных средств обучения. Печатные средства обучения использовались на уроках значительно чаще (89,7% уроков), чем ЭСО (38% уроков), и более продолжительно (61,6 и 16,1% соответственно).

Использование ЭСО является важным компонентом учебного процесса, так как при рациональном применении способствует активизации познавательной деятельности обучающихся, их мотивации к обучению и повышению качества знаний, но вместе с тем может приводить к интенсификации интеллектуальной деятельности, повышению напряжённости образовательного процесса на уроке и, следовательно, к ухудшению показателей функционального состояния организма обучающихся [12, 13].

На занятиях в 10–11-х классах ЭСО применялись по необходимости, что позволяет считать такой характер их использования педагогически оправданным. ЭСО коллективного использования применялись в 5 раз чаще, чем ЭСО индивидуального использования (34,5 и 6,8% уроков соответственно). Режим использования ЭСО (продолжительность и одновременность использования) соответствовал гигиеническим нормативам.

В целом анализ показателей, характеризующих интеллектуальные нагрузки обучающихся 10–11-х классов (высокая плотность урока и сосредоточенность внимания учеников на учебной работе, частая смена видов учебной деятельности, использование различных средств обучения, в том числе одновременно; преобладание видов учебной работы 3-й степени сложности с учётом алгоритма её выполнения), свидетельствует о напряжённости учебной деятельности на занятиях. Это согласуется с данными других исследований [3, 7–10], показавших, что напряжённость учебного процесса во многом определяется интеллектуальными нагрузками.

Следует отметить, что комфортный режим выполнения старшеклассниками учебных заданий практически в течение всего урока позволял в определённой степени нивелировать их утомительность и снизить напряжённость учебной деятельности, так как имел более низкую «физиологическую цену», чем учебная работа, которая выполнялась в условиях ограничения или дефицита времени.

Монотонность учебной обстановки и учебной деятельности обучающихся прослеживалась лишь на единичных уроках (3,5 и 5,2% уроков соответственно), не превышая 2,3% учебного времени за неделю. Следует учитывать, что однообразие образовательной среды и монотонность учебного процесса можно устранить путём использования различных методических приёмов, которые создадут условия для смены видов деятельности на уроке, персонализации обучения и развития мотивации обучающихся [14, 15]. Так, организуемые педагогами интерактивные виды деятельности на учебных занятиях в 10–11-х классах хотя

и имели непродолжительный характер (3% учебного времени за неделю), но способствовали снижению монотонности учебных нагрузок старшеклассников.

Значимым фактором сохранения физического и психического здоровья обучающихся является создание в школе благоприятного психологического климата, который определяется характером взаимоотношений между учителем и обучающимися, стилем преподавания на уроке, включением в структуру урока эмоциональных разрядок и др. [14–16]. С учётом полученных данных на учебных занятиях в 10–11-х классах (отсутствие конфликтных ситуаций, демократический стиль преподавания и благоприятный эмоциональный фон на большинстве уроков, а также наличие эмоциональных разрядок не менее чем на 12% уроков) уровень напряжённости эмоциональных нагрузок старшеклассников в процессе учебной деятельности оценивается как допустимый.

В условиях повышенных образовательных нагрузок в современной школе несоблюдение гигиенических регламентов в части организации физкультминуток в процессе большинства уроков в 10–11-х классах во многом способствует развитию статического и учебного утомления обучающихся, повышению напряжённости их образовательной деятельности.

**Ограничения исследования.** Исследование ограничено выборкой показателей, характеризующих организацию образовательной деятельности обучающихся на уроке на этапе среднего общего образования, что не позволяет в полной мере экстраполировать полученные данные на этапы начального общего и основного общего образования.

## Заключение

В современной школе образовательные нагрузки определяются продолжительностью учебной деятельности, содержанием различных видов деятельности обучающихся и формой организации их работы в процессе урока, требованиями, предъявляемыми к обучающимся, а также методиками, технологиями и средствами обучения, уровнем интенсификации учебной деятельности на уроке.

В условиях цифровой трансформации образования возрастает значение таких составляющих учебных нагрузок обучающихся, как интеллектуальные, информационные (сенсорные) и психоэмоциональные нагрузки, режим учебной деятельности в динамике учебного дня и недели, которые определяют напряжённость образовательной деятельности.

Для объективной оценки учебных нагрузок и напряжённости образовательной деятельности обучающихся необходимо учитывать сложность учебных заданий и ограничения их выполнения во времени, монотонность учебной работы, используемые средства обучения, наличие двигательного компонента и характеристику эмоционального фона. Данные показатели могут и должны оцениваться с гигиенических позиций в процессе гигиенического наблюдения (в том числе хронометражного). Это актуализирует разработку всего комплекса показателей напряжённости образовательной деятельности обучающихся разного возраста.

## Литература

1. Степанова М.И., Седова А.С. О проблеме учебных перегрузок в российских школах. *Отечественная и зарубежная педагогика*. 2023; 1(6): 65–78. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-96-65-78> <https://elibrary.ru/solzmq>
2. Кучма В.Р., Седова А.С., Поленова М.А., Болдырева М.Г. Гигиенические проблемы использования современных информационно-коммуникационных технологий и средств их обеспечения в цифровой образовательной среде. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(4): 349–357. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-4-349-357> <https://elibrary.ru/vwazlg>
3. Эйфельд Д.А., Устинова О.Ю., Зайцева Н.В., Савочкина А.А. Оценка потенциальной опасности влияния риск-индуцирующих факторов образовательного процесса и среды обитания на соматическое здоровье учащихся школ различного типа. *Анализ риска здоровью*. 2022; (4): 72–86. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.4.07> <https://elibrary.ru/psfabv>
4. Ефимова Н.В., Мыльникова И.В. Проблема формирования новой индикаторной патологии у детей в период внедрения цифровой школы. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(11): 1344–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1344-1349> <https://elibrary.ru/xmcfoa>
5. Кучма В.Р., Рапопорт И.К., Седова А.С., Соколова С.Б. Состояние здоровья детей и подростков в связи с условиями и организацией воспитания и обучения. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(4): 393–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-4-393-399> <https://elibrary.ru/pkoozf>
6. Кучма В.Р., Ткачук Е.А., Ефимова Н.В., Мыльникова И.В. Гигиеническая оценка напряженности учебной деятельности. В кн.: *Руководство по гигиене детей и подростков, медицинскому обеспечению обучающихся в образовательных организациях*. Том 1. М.; 2019: 253–72.

7. Сетко Н.П., Булычева Е.В., Валова А.Я. Современные подходы к оценке напряженности учебного процесса в образовательных учреждениях различного типа. *Оренбургский медицинский вестник*. 2018; 6(2): 47–52. <https://elibrary.ru/xycadz>
8. Валина С.Л., Штина И.Е., Ошева Л.В., Устинова О.Ю., Эйфельд Д.А. Гигиеническая оценка учебного процесса в школах с различными образовательными программами. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(2): 166–70. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-166-170> <https://elibrary.ru/ppykff>
9. Булычева Е.В. Гигиеническая оценка учебных нагрузок у современных учащихся. *Российский вестник гигиены*. 2021; (4): 12–20. <https://doi.org/10.24075/rbh.2021.025> <https://elibrary.ru/dcjnbs>
10. Булычева Е.В., Антохин Е.Ю. Гигиеническая и психологическая оценка напряженности дистанционного учебного процесса у учащихся начальных классов. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(4): 375–81. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-375-381> <https://elibrary.ru/wcbpme>
11. Храмов П.И., Седова А.С. Особенности умственной работоспособности младших школьников в процессе обучения в режиме динамических поз. *Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья*. 2021; (3): 52–4. <https://elibrary.ru/vpyuxr>
12. Александрова И.Э. Гигиеническая оптимизация учебного процесса в школе в условиях использования электронных средств обучения. *Анализ риска здоровью*. 2020; (2): 47–54. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.2.05> <https://elibrary.ru/pplebu>
13. Лангуев К.А. Влияние цифровых средств обучения во время учебных занятий на умственную работоспособность, показатели центральной нервной системы и психоэмоциональное состояние учащихся старших классов. В кн.: *Качество педагогического образования в условиях современных вызовов. Сборник научных трудов IX Международного форума по педагогическому образованию*. Казань; 2023: 255–65. <https://elibrary.ru/ipgfrx>
14. Погребняк Е.В. Учебная мотивация как основной фактор результативности образовательного процесса: основные мотивационные стратегии. *Сибирский учитель*. 2023; (4): 10–6. <https://elibrary.ru/gigeam>
15. Николаева А.А., Савченко И.А. Инновационные технологии обучения как средство повышения мотивации школьников в учебной деятельности. *Язык и текст*. 2023; 10(1): 76–91. <https://doi.org/10.17759/langt.2023100109> <https://elibrary.ru/yiylyk>
16. Ганузин В.М. Влияние психотравмирующих факторов образовательной среды на детей. *Российский педиатрический журнал*. 2025; 28(2): 55–9. <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2025-28-2-155-159> <https://elibrary.ru/zorxbd>

## References

1. Stepanova M.I., Sedova A.S. On the problem of learning overload in Russian schools. *Otechestvennaya i zarubezhnaya pedagogika*. 2023; 1(6): 65–78. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-96-65-78> <https://elibrary.ru/solzmq> (in Russian)
2. Kuchma V.R., Sedova A.S., Polenova M.A., Stepanova M.I., Boldyreva M.G. Hygienic problems of using modern information and communication technologies and means of providing them in the digital educational environment. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(4): 349–57. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-4-349-357> <https://elibrary.ru/wvazlg> (in Russian)
3. Eisfeld D.A., Ustinova O.Yu., Zaitseva N.V., Savochkina A.A. Assessment of the potential danger of the influence of risk-inducing factors of the educational process and the living environment on the somatic health of students in various types of schools. *Health Risk Analysis*. 2022; (4): 72–86. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.4.07> <https://elibrary.ru/dnvkgz>
4. Efimova N.V., Mylnikov I.V. The problem of the formation of a new indicator pathology in children during the implementation of the «digital school». *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(11): 1344–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1344-1349> <https://elibrary.ru/xmcfao> (in Russian)
5. Kuchma V.R., Rapoport I.K., Sedova A.S., Sokolova S.B. The health in children and adolescents in relation to the conditions and management of upbringing and education. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2026; 105(4): 393–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-4-393-399> <https://elibrary.ru/pkoozf> (in Russian)
6. Kuchma V.R., Tkachuk E.A., Efimova N.V., Mylnikov I.V. Hygienic assessment of the intensity of educational activity of students. In: *Guidelines for the Hygiene of Children and Adolescents, and Medical Care for Students in Educational Institutions: Organizational Model, Federal Recommendations for Providing Medical Care to Students. Volume I [Rukovodstvo po gigiene detei i podrostkov, meditsinskomu obespecheniyu obuchayushchikhsya v obrazovatel'nykh organizatsiyakh. Tom I]*. Moscow; 2019: 253–72. (in Russian)
7. Setko N.P., Bulychева E.V., Valova A.Ya. Modern approaches to the modeling of the psychoemotional state of students with the help of modern digital technologies. *Orenburgskii meditsinskii vestnik*. 2018; 6(2): 47–52. <https://elibrary.ru/xycadz> (in Russian)
8. Valina S.L., Shtina I.E., Osheva L.V., Ustinova O.Yu., Eisfeld D.A. Hygienic assessment of the educational process in schools with different educational programs. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(2): 166–70. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-166-170> <https://elibrary.ru/ppykff> (in Russian)
9. Bulychева E.V. Hygienic assessment of the academic load in modern students. *Rossiiskii vestnik gigieny*. 2021; (4): 12–20. <https://doi.org/10.24075/rbh.2021.025> <https://elibrary.ru/dcjnbs> (in Russian)
10. Bulychева E.V., Antokhin E.Yu. Hygienic and psychological assessment of the intensity of the remote educational process in grade schoolers. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(4): 375–81. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-375-381> <https://elibrary.ru/wcbpme> (in Russian)
11. Khramtsov P.I., Sedova A.S. Mental capacity aspects in primary schoolers practicing change of dynamic position. *Voprosy shkol'noi i universitetskoi meditsiny i zdorov'ya*. 2021; (3): 52–4. <https://elibrary.ru/vpyuxr> (in Russian)
12. Aleksandrova I.E. Hygienic optimization of educational process at school involving massive use of electronic learning devices. *Health Risk Analysis*. 2020; (2): 47–54. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.2.05> <https://elibrary.ru/zvcuo> (in Russian)
13. Languyev K.A. The impact of digital learning tools during classroom activities on mental performance, central nervous system indicators, and psychoemotional state of high school students. In: *The Quality of Teacher Education in the Face of Modern Challenges. Proceedings of the IX International Forum on Teacher Education [Kachestvo pedagogicheskogo obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov. Sbornik nauchnykh trudov IX Mezhdunarodnogo foruma po pedagogicheskomu obrazovaniyu]*. Kazan'; 2023: 255–65. <https://elibrary.ru/ipgfrx> (in Russian)
14. Pogrebnyak E.V. Educational motivation as the main factor of the effectiveness of the educational process: the main motivational strategies. *Sibirskii uchitel'*. 2023; (4): 10–6. <https://elibrary.ru/gigeam> (in Russian)
15. Nikolaeva A.A., Savchenko I.A. Innovative educational methods and their role in increasing students' motivation. *Yazyk i tekst*. 2023; 10(1): 76–91. <https://doi.org/10.17759/langt.2023100109> <https://elibrary.ru/yiylyk> (in Russian)
16. Ganuzin V.M. Influence of psychotraumatic factors of the educational environment on children. *Rossiiskii pediatricheskii zhurnal*. 2025; 28(2): 55–9. <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2025-28-2-155-159> <https://elibrary.ru/zorxbd> (in Russian)

## Сведения об авторах

**Кучма Владислав Ремирович**, доктор мед. наук, профессор, чл.-корр. РАН, науч. руководитель Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия

**Поленова Марина Альбертовна**, доктор мед. наук, гл. науч. сотр. отд. гигиены детей, подростков и молодежи Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: polenova.ma@fncg.ru

**Седова Анна Сергеевна**, канд. мед. наук, зав. отд. гигиены детей, подростков и молодежи Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия

**Вирабова Анна Рафаиловна**, доктор мед. наук, профессор каф. гигиены детей и подростков ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России, 119991, Москва, Россия

## About the authors

**Vladislav R. Kuchma**, DSc (Medicine), professor, corr. member of RAS, head, Department of hygiene of children, adolescents, and youth, Institute of Complex Problems of Hygiene of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation; I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1410-5546>

**Marina A. Polenova**, DSc (Medicine), chief researcher, Department of hygiene of children, adolescents, and youth, Institute of Complex Problems of Hygiene of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7568-3342> E-mail: polenova.ma@fncg.ru

**Anna S. Sedova**, PhD (Medicine), Department of hygiene of children, adolescents, and youth, Institute of Complex Problems of Hygiene of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0079-240X>

**Anna R. Virabova**, DSc (Medicine), professor, Department of hygiene for children and adolescents (school hygiene), I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7508-9159>



Сетко Н.П.<sup>1</sup>, Лукьянов С.Э.<sup>2</sup>, Сетко А.Г.<sup>1</sup>, Жданова О.М.<sup>2</sup>

## Особенности психофизиологического состояния детей и подростков в зависимости от продолжительности использования различных электронных средств обучения

<sup>1</sup>ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный медицинский университет» Минздрава России, 460014, Оренбург, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Трансформация общего образования привела к новым рискам для здоровья учащихся вследствие активного взаимодействия с электронными средствами обучения.

**Материалы и методы.** Исследования проведены в инновационных образовательных организациях Оренбурга. У 862 учащихся трёх групп с различной продолжительностью работы с электронными средствами обучения проведена оценка функционального состояния организма, уровня стресса, познавательной активности, тревожности, негативных эмоциональных переживаний, интернет-зависимости.

**Результаты.** С увеличением длительности работы с электронными средствами усиливается неустойчивость нервной реакции, изменяется тип регуляции сердечного ритма, истощаются функциональные резервы учащихся. Максимальное время использования электронных средств приводит к повышению у старшеклассников уровня стресса на 19,7%, тревожности на 57,7%, негативных эмоциональных переживаний на 96,5%. У 2,7% старшеклассников развивается интернет-зависимость, а у 22,7% — склонность к интернет-зависимости.

**Ограничения исследования.** Исследование проведено на базе двух образовательных организаций инновационного типа, что не позволяет экстраполировать полученные результаты на учащихся образовательных организаций традиционного типа.

**Заключение.** Работа учащихся начальной школы с электронными средствами более пяти часов в сутки, учащихся среднего звена обучения — более 7 ч в сутки, старшего звена обучения — более 11 ч в сутки приводит к изменениям типа регуляции сердечного ритма, функционирования центральной и вегетативной нервной систем. Увеличение времени работы с электронными средствами приводит к неустойчивости нервной реакции учащихся, тревожности, повышению уровня стресса, истощению функциональных резервов, негативным эмоциональным переживаниям, формированию склонности к интернет-зависимости.

**Ключевые слова:** гигиена; учащиеся; электронные средства обучения; психофизиологическое состояние; стресс; интернет-зависимость

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО ОрГМУ Минздрава России (протокол № 86 от 06.03.2026 г.). Все участники и их законные представители дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

**Для цитирования:** Сетко Н.П., Лукьянов С.Э., Сетко А.Г., Жданова О.М. Особенности психофизиологического состояния детей и подростков в зависимости от продолжительности использования различных электронных средств обучения. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1027–1035. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1027-1035> <https://elibrary.ru/jyvojv>

**Для корреспонденции:** Лукьянов Сергей Эдуардович, e-mail: c\_luk\_10@mail.ru

**Вклад авторов:** Сетко Н.П., Сетко А.Г. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Лукьянов С.Э., Жданова О.М. — сбор и обработка материала, статистический анализ, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 17.04.2026 / Поступила после доработки: 30.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Nina P. Setko<sup>1</sup>, Sergey E. Lukyanov<sup>2</sup>, Andrey G. Setko<sup>1</sup>, Olesya M. Zhdanova<sup>2</sup>

## Features of the psychophysiological state in children and adolescents depending on the time of use of various electronic learning tools

<sup>1</sup>Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Moscow, 141014, Russian Federation;

<sup>2</sup>Orenburg State Medical University, Orenburg, 460000, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The ongoing transformation of general education has introduced new health risks for students due to their intensive use of digital learning tools.

**Materials and methods.** The study was conducted at innovative educational institutions in Orenburg. We assessed eight hundred sixty two students divided into three groups based on their varying durations of exposure to digital learning tools. The assessment evaluated their overall physiological state, stress levels, cognitive activity, anxiety, negative emotional states, and internet addiction.

**Results.** As the time spent using electronic devices increases, nervous response instability intensifies, heart rate regulation patterns change, and students' functional reserves become depleted. The highest levels of device usage lead to an increase by 19.7% in stress levels, a 57.7% increase in anxiety, and a 96.5% increase in negative emotional states among high school students. Furthermore, 2.7% of high school students exhibit internet addiction, while 22.7% show a predisposition to it.

**Limitations.** The study was conducted on the basis of two innovative educational institutions in Orenburg, where the use of various types of electronic learning tools is long-term, which does not allow for full extrapolating of the results to students in traditional educational institutions.

**Conclusion.** Elementary school students spend more than five hours a day using electronic devices, middle school students spend over seven hours, and high school students spend more than 11 hours daily. This extensive usage alters heart rate regulation patterns and affects the functioning of the central and autonomic nervous systems. Increased screen time leads to unstable nervous system responses, heightened anxiety and stress, depletion of functional reserves, adverse emotional states, and a growing predisposition to internet addiction.

**Keywords:** students; hygienic assessment; electronic learning tools; psychophysiological state; stress prevention; Internet addiction

**Compliance with ethical standards.** The study complies with the latest revision of the Helsinki Declaration; approved by the local ethics committee of the Orenburg State Medical University. All participants and their legal representatives provided voluntary written informed consent to participate in the study.

**For citation:** Setko N.P., Lukyanov S.E., Setko A.G., Zhdanova O.M. Features of the psychophysiological state in children and adolescents depending on the time of the use of various electronic learning tools. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1027–1035. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1027-1035> <https://elibrary.ru/jyvojv> (In Russ.)

**For correspondence:** Sergey E. Lukyanov, e-mail: c\_luk\_10@mail.ru

**Contribution:** Setko N.P., Setko A.G. — concept and design of the study, editing; Lukyanov S.E., Zhdanova O.M. — collecting and processing the material, statistical processing, writing the text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: April 17, 2026 / Revised: June 30, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Инновационная трансформация системы общего образования привела к активному взаимодействию учащихся с различными электронными средствами обучения (ЭСО) и определила для современных школьников различных возрастных групп новые риски для здоровья [1–6]. В литературе отсутствуют систематизированные данные о суммарном времени использования ЭСО. По данным Скоблиной Н.А. и соавт. [7], Маркеловой С.В. и соавт. [8], в образовательной деятельности учащиеся используют ЭСО до 7 ч в день, тогда как, согласно исследованиям Богомоловой Е.С. и соавт. [9], суммарное время работы учащихся с девайсами составляет не более 6 ч, хотя и эти показатели превышают гигиенический норматив и определяют риск для здоровья [10, 11]. Имеются данные о том, что факторы, связанные с продолжительным использованием цифровых устройств, тесно связаны с отклонениями в функционировании органов и систем [12]. Так, доказаны увеличение электроэнцефалической активности головного мозга за счёт выраженного утомления в коре больших полушарий [13, 14], снижение памяти, внимания [15], остроты зрения, нарушение аккомодации, развитие психоэмоционального перенапряжения [16–20].

Представленные данные о развитии интернет-зависимости у учащихся разрозненны, получены с использованием различных методик, что не позволяет провести адекватное сравнение и получить целостное представление о механизме формирования данного феномена.

Вместе с тем, несмотря на пристальное внимание к проблеме влияния ЭСО на здоровье учащихся, отсутствует достаточная доказательная база, подтверждающая влияние ЭСО на функционирование основных систем, задействованных в учебном процессе. Не установлены особенности формирования биологической и психологической адаптации у учащихся в зависимости от ступеней общего образования и экспозиции действия ЭСО. Отсутствуют данные о стрессогенности цифровых образовательных технологий и их значении в развитии феномена интернет-зависимости. Увеличение объёма использования электронных образовательных технологий и интенсификация информационной нагрузки обуславливают необходимость оценки психологического статуса, функционального состояния основных систем организма учащихся при работе с информационно-коммуникационными технологиями, требуют научного обоснования персонализированных профилактических мероприятий для предотвращения школьной дезадаптации и риска развития болезней. Это определяет актуальность и научную новизну проведённых исследований.

*Цель исследования* — оценить психофизиологические особенности состояния организма учащихся в зависимости от времени использования электронных средств обучения для осуществления оптимальных биологических и социальных функций.

## Материалы и методы

Проведён комплекс психофизиологических и статистических исследований с участием 862 учащихся на базе двух образовательных организаций инновационного типа Оренбурга (лицей № 5 и гимназия № 4), обучение в которых организовано по авторским учебным программам. Уроки характеризуются высокой плотностью, а в учебной деятельности учащихся начального, среднего и старшего звена обучения предусмотрена различная длительность использования электронных средств обучения. Исследование организовано с соблюдением принципов Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (2013 г.) при наличии письменного добровольного информированного согласия родителей (законных представителей) на проведение обследования [21].

*Критерии включения:* наличие письменного добровольного информированного согласия родителей (законных представителей) на проведение обследования, принадлежность участников к I–III группам здоровья.

*Критерии исключения:* отказ от участия в обследовании, обострение хронических и наличие острых болезней у учащихся на момент обследования.

Все учащиеся, включённые в исследование, разделены на три группы в зависимости от возраста и ступени образования: 1-я группа — 344 учащихся начального звена (158 мальчиков и 186 девочек, возраст 7–10 лет, средний возраст  $8,96 \pm 0,07$  года), 2-я группа — 365 учащихся среднего звена (190 мальчиков и 175 девочек, 11–14 лет, средний возраст  $13,52 \pm 0,07$  года), 3-я группа — 153 учащихся старшего звена (73 юноши и 80 девушек, возраст 15–17 лет, средний возраст  $16,83 \pm 0,1$  года). Отбор участников проведён методом случайной выборки в соответствии с критериями включения и исключения. Расчёт минимального числа обследуемых проведён по формуле Д.А. Сапетлиева под редакцией А.М. Меркова [22]. Число участников в каждой из исследуемых групп превышает минимальное ( $n = 100$ ), что обеспечивает достаточность выборки и даёт возможность дальнейшей статистической обработки.

Оценка времени использования электронных средств обучения в учебной деятельности проведена хронометражным методом на 37 уроках с расчётом среднего показателя, во внеучебной деятельности — анкетным методом с помощью анализа 860 анкет.

Функциональное состояние центральной нервной системы (ЦНС) исследовано методом вариационной хроно-рефлексометрии на аппаратно-программном комплексе «Экспресс-диагностика функционального состояния и работоспособности человека» по методике М.П. Мороз [23]. На основе регистрации латентных периодов простой зрительно-моторной реакции и их последующего статистического анализа программой производился автоматический расчёт показателей функционального уровня ЦНС (ФУС), устойчивости нервной реакции (УР) и уровня функциональных возможностей сформированной функциональной системы (УФВ). Оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы выполнена с помощью аппаратно-программного комплекса «Здоровье-Экспресс» (ООО «Медицинские компьютерные системы» (МКС), Россия) с автоматической оценкой адаптационных резервов организма.

Оценка стресса проведена с помощью опросника «Шкала психологического стресса PSM-25» в модификации Водопьяновой Н.Е. [24]. Определение тревожности и негативных эмоциональных переживаний выполнено по опроснику Ч.Д. Спилбергера (STPI — State Trait Personal Inventory) в модификации А.Д. Андреевой [25]. Вероятность и уровень выраженности развития интернет-зависимости определены опросным методом по шкале Жичкиной А.Е. [26].

Результаты исследования обработаны с использованием программного обеспечения StatTech v. 3.1.8 (ООО «Статтех», Россия). Применение параметрических методов было оправдано нормальным распределением количественных показателей согласно критерию Колмогорова — Смирнова. Сравнение исследуемых групп по количественным данным осуществлялось с помощью  $t$ -критерия Стьюдента для независимых выборок; категориальных данных — с использованием критерия хи-квадрат Пирсона ( $\chi^2$ ). Статистическая значимость различий между группами устанавливалась при  $p < 0,05$ .

## Результаты

Установлено, что доля суммарного времени работы с ЭСО от общего времени учебной нагрузки в неделю была наибольшей у учащихся старшего звена (3-я группа) и составляла 54,1% (более 50% учебного времени во все дни недели); у учащихся среднего (2-я группа) и начального звена (1-я группа) — 30,6 и 28,1% соответственно (рис. 1). Наибольший процент времени работы с ЭСО от общей учебной нагрузки в суточном диапазоне выявлен у учащихся начальной школы (1-я группа) в понедельник (36,4%) и четверг (27,7%) —  $70,7 \pm 2$  и  $51,4 \pm 2,23$  мин соответственно; у учащихся 2-й группы — в понедельник ( $35,5\% - 86,7 \pm 3,96$  мин); у уча-

щихся 3-й группы — в пятницу ( $56,6\% - 141,4 \pm 15,62$  мин) и во вторник ( $56,5\% - 146,9 \pm 19,8$  мин). Такие показатели не соответствовали физиологическим нормам распределения работоспособности в течение учебной недели.

Среднее время использования ЭСО на уроке учащимися начального звена (1-я группа) составило  $14,3 \pm 1,8$  мин; учащимися среднего звена (2-я группа) —  $15,9 \pm 1,4$  мин, учащимися старшего звена (3-я группа) —  $24,4 \pm 2,1$  мин с максимальной продолжительностью использования ЭСО учащимися 1-й и 2-й групп на уроке «Разговоры о важном» ( $31,9 \pm 0,94$  и  $32,2 \pm 0,56$  мин соответственно); учащимися 3-й группы на уроке «Информатика и информационно-коммуникационные технологии» —  $38 \pm 2,37$  мин (рис. 2).

Во внеучебной деятельности суточная продолжительность использования ЭСО составляла у учащихся 1-й группы  $4,4 \pm 0,16$  ч; у учащихся 2-й группы —  $6,2 \pm 0,21$  ч и у учащихся 3-й группы —  $9,3 \pm 0,64$  ч (табл. 1). При этом во внеучебное время структура времени работы с различными электронными средствами у учащихся обследованных групп была разной в течение суток. Так, учащиеся начальной школы (1-я группа) больше всего работали с мобильными телефонами ( $80,6 \pm 6,07$  мин), планшетами ( $71,9 \pm 14,53$  мин) и компьютерами ( $64,3 \pm 9,74$  мин), в то время как учащиеся среднего звена обучения (2-я группа) — с мобильными телефонами ( $107,3 \pm 7,76$  мин), ноутбуками ( $97,1 \pm 12,27$  мин), планшетами ( $84,5 \pm 17,69$  мин), а учащиеся старшего звена обучения (3-я группа) больше времени использовали в работе планшеты ( $198,7 \pm 33,36$  мин), мобильные телефоны ( $178,2 \pm 15,77$  мин), ноутбуки ( $93,3 \pm 15,01$  мин).

Установлено, что в течение суток общее время, которое учащиеся тратят на работу с различными ЭСО, составляет у учащихся начальной школы (1-я группа) в среднем  $5,27 \pm 2,4$  ч, у учащихся среднего звена обучения (2-я группа) —  $7,41 \pm 2,1$  ч, у старшеклассников (3-я группа) —  $11,5 \pm 3,8$  ч. Это в определённой степени определяет разницу в ответной реакции основных систем организма учащихся обследуемых групп при работе с ЭСО.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показал, что наиболее неустойчивая нервная реакция при работе с электронными средствами наблюдается у учащихся начальной школы (1-я группа) — как у мальчиков, так и у девочек ( $0,85 \pm 0,06$  и  $0,85 \pm 0,05$  ед. соответственно). Тенденция формирования устойчивой нервной реакции у старшеклассников (3-я группа) и рост показателей УР по сравнению с данными учащихся 1-й обследуемой группы мальчиков на  $58,8\%$  (с  $0,85 \pm 0,06$  до  $1,35 \pm 0,08$  ед.;  $p \leq 0,05$ ) и у девочек на  $44,7\%$  (с  $0,85$  до  $1,23 \pm 0,09$  ед.;  $p \leq 0,05$ ) за счёт увеличения ФУС у мальчиков на  $18,1\%$  и у девочек на  $16,6\%$ , а также УФВ соответственно у мальчиков на  $37,7\%$  и у девочек

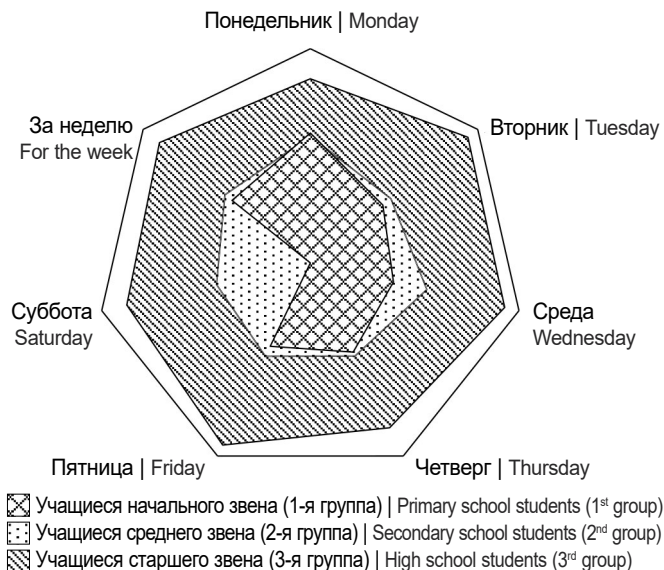


Рис. 1. Доля времени использования электронных средств обучения от общего учебного времени учащихся обследуемых групп (%).

Fig. 1. The share of time spent using electronic learning tools from the total study time of students in the study groups (%).

на  $30,3\%$  свидетельствует о способности центральной нервной системы у учащихся старшего звена (3-я группа) формировать адаптационную функциональную систему при работе с электронными средствами обучения.

Математический анализ сердечного ритма учащихся обследуемых групп, представленный в табл. 3, показал изменение типа регуляции при работе с ЭСО. Выявлено, что для учащихся начальной школы (1-я группа) характерно преобладание симпатического типа регуляции за счёт высокой мощности низкочастотных волн в диапазоне  $0,15-0,04$  Гц, уровень которых составлял  $1319,3 \pm 184,64$   $\text{mc}^2$ , высокой мощности очень низкочастотной составляющей спектра (VLF) —  $659,99 \pm 147,17$   $\text{mc}^2$ , а также преобладание высокого значения стресс-индекса (СИ), который превышал 100 усл. ед. и составлял  $155,47 \pm 14,26$  ед. У учащихся 2-й и 3-й обследуемых групп установлен тип регуляции сердечного ритма с умеренным преобладанием симпатической и центральной регуляции в условиях снижения активности автономного контура за счёт высоких показателей СИ, которые у учащихся 2-й группы составляли  $128,96 \pm 8,05$  ед., а у уча-

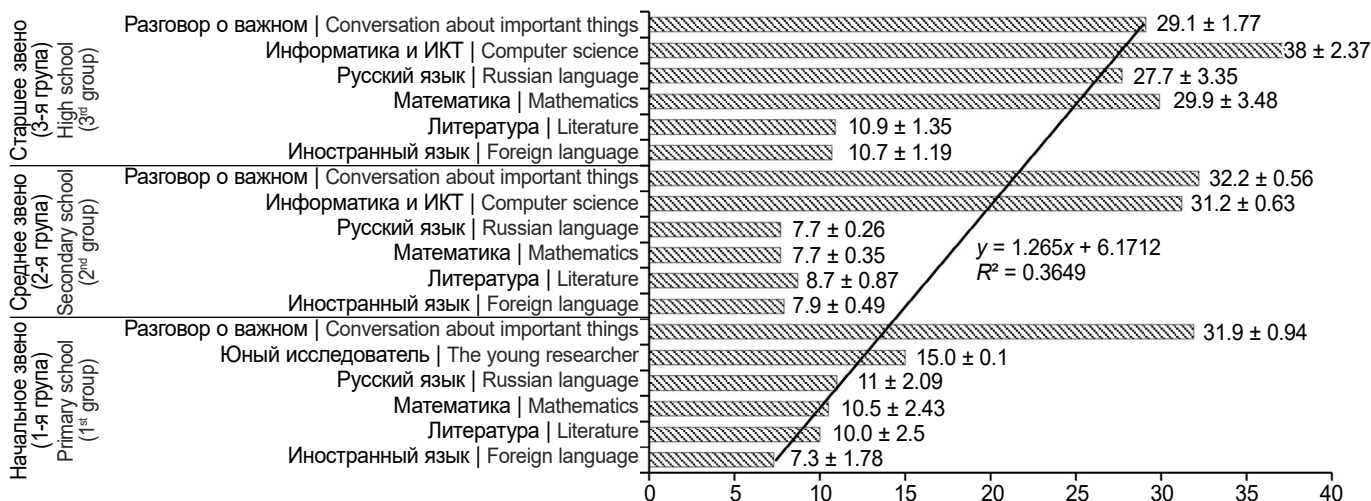


Рис. 2. Время использования электронных средств обучения на уроках учащихся обследуемых групп (мин).

Fig. 2. The time spent using electronic learning tools in the lessons in students in the study groups (minutes).

Таблица 1 / Table 1

**Время использования электронных средств обучения различного типа во внеучебной деятельности учащихся исследуемых групп в сутки**

Time spent using various types of electronic learning tools in extracurricular activities by students in the study groups per day

| Электронное средство обучения<br>Electronic learning tool | Обследуемые группы   Studied groups |                       |                       |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                           | 1-я   1 <sup>st</sup>               | 2-я   2 <sup>nd</sup> | 3-я   3 <sup>rd</sup> |
| Мобильный телефон, мин   Mobile phone, minutes            | 80.6 ± 6.07*                        | 107.3 ± 7.76**        | 178.2 ± 15.77***      |
| Планшет, мин   Tablet, minutes                            | 71.9 ± 14.53                        | 84.5 ± 17.69**        | 198.7 ± 33.36***      |
| Компьютер, мин   Computer, minutes                        | 64.3 ± 9.74                         | 81.7 ± 12.8           | 88.0 ± 9.53           |
| Ноутбук, мин   Laptop, minutes                            | 47.9 ± 6.98*                        | 97.1 ± 12.27          | 93.3 ± 15.01**        |
| Суммарное время, ч   Total time, hours                    | 4.4 ± 0.16*                         | 6.2 ± 0.21**          | 9.3 ± 0.64***         |

Примечание. Здесь и в табл. 3, 5: \*  $p \leq 0,05$  при сравнении данных 1-й и 2-й групп; \*\* —  $p \leq 0,05$  при сравнении данных 2-й и 3-й групп; \*\*\* —  $p \leq 0,05$  при сравнении данных 1-й и 3-й групп.

Note: Here and in Tables 3, 5: \* —  $p \leq 0.05$  comparing the data of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> groups; \*\* —  $p \leq 0.05$  comparing the data of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> groups; \*\*\* —  $p \leq 0.05$  comparing the data of the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> groups.

щихся 3-й группы —  $137,1 \pm 13,08$  ед., что свидетельствует об умеренном напряжении регуляторных систем организма.

Выявлены гендерные различия вегетативной регуляции у учащихся среднего (2-я группа) и старшего (3-я группа) звеньев обучения, характеризующиеся преобладанием симпатического отдела вегетативной регуляции у девочек и девушек по сравнению с мальчиками и юношами 2-й и 3-й обследуемых групп (табл. 4). Так, у девочек среднего звена обучения (2-я группа) выявлено выраженное преобладание симпатической регуляции, о чём свидетельствует увеличение по сравнению с мальчиками индекса вегетативного равновесия на 27,9% ( $229,66 \pm 15,52$  ед. у девочек и  $179,52 \pm 9,18$  ед. у мальчиков;  $p \leq 0,05$ ); вегетативного показателя ритма сердца на 14,6% ( $7,17 \pm 0,33$  ед. у девочек и  $6,12 \pm 0,22$  ед. у мальчиков;  $p \leq 0,05$ ) и индекса напряжения регуляторных систем на 24,8% ( $171,68 \pm 13,85$  ед. у девочек и  $129,06 \pm 8,03$  ед. у мальчиков;  $p \leq 0,05$ ).

У девушек 3-й группы рассогласованность между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной

нервной системы сохранялась с преобладанием симпатической регуляции, что также подтверждается увеличением у девушек по сравнению с юношами индекса вегетативного равновесия на 12,57% ( $196,01 \pm 12,27$  ед. у девушек и  $174,11 \pm 16,12$  ед. у юношей;  $p > 0,05$ ), вегетативного показателя ритма сердца на 16,6% ( $6,52 \pm 0,32$  ед. у девушек и  $5,59 \pm 0,34$  ед. у юношей;  $p \leq 0,05$ ) и индекса напряжения регуляторных систем на 15,5% ( $138,08 \pm 9,71$  ед. у девушек и  $119,57 \pm 12,67$  ед. у юношей;  $p \leq 0,05$ ).

Установлено, что нарушение типа регуляции у учащихся в условиях длительной работы с различными электронными средствами приводит к функциональному напряжению и снижению функциональных резервов. Так, перенапряжение регуляторных механизмов выявлено у 45% учащихся 1-й группы, 40% учащихся 2-й группы и 35,5% учащихся 3-й группы, а истощение функциональных резервов — у 13,1; 12 и 9,7% учащихся соответственно (рис. 3). При этом в 1-й и 2-й группах наибольшее истощение функциональных резервов выявлено у девочек (15,2% против 10,5% у мальчиков

Таблица 2 / Table 2

**Показатели функционального состояния центральной нервной системы учащихся обследуемых групп (единицы)**

Indicators of the functional state of the central nervous system (units)

| Показатель<br>Indicator                                                                                             | Обследуемые группы   Studied groups |                 |                       |                 |                       |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
|                                                                                                                     | 1-я   1 <sup>st</sup>               |                 | 2-я   2 <sup>nd</sup> |                 | 3-я   3 <sup>rd</sup> |                  |
|                                                                                                                     | Мальчики   Boys                     | Девочки   Girls | Мальчики   Boys       | Девочки   Girls | Юноши   Young men     | Девушки   Women  |
| <i>M</i>                                                                                                            | 399.98 ± 5.66                       | 404.51 ± 4.55   | 335.09 ± 4.27         | 347.6 ± 3.26**  | 319.32 ± 4.85         | 338.77 ± 4.59*** |
| <i>s</i>                                                                                                            | 129.56 ± 10.23                      | 107.31 ± 7.18   | 82.49 ± 7.62          | 71.99 ± 3.94    | 68.56 ± 4.6           | 68.63 ± 2.57     |
| <i>Mo</i>                                                                                                           | 0.35 ± 0.01                         | 0.36 ± 0.01     | 0.3 ± 0.01            | 0.31 ± 0.01     | 0.29 ± 0.01           | 0.31 ± 0.01***   |
| <i>Pmax</i>                                                                                                         | 0.22 ± 0.01                         | 0.22 ± 0.01     | 0.27 ± 0.01           | 0.25 ± 0.01**   | 0.28 ± 0.01           | 0.27 ± 0.01      |
| <i>dT</i>                                                                                                           | 0.1 ± 0.01                          | 0.1 ± 0.01      | 0.09 ± 0.01           | 0.1 ± 0.01      | 0.08 ± 0.01           | 0.09 ± 0.01      |
| <i>T</i>                                                                                                            | 0.38 ± 0.01                         | 0.39 ± 0.01     | 0.33 ± 0.01           | 0.34 ± 0.01     | 0.31 ± 0.01           | 0.33 ± 0.01      |
| Функциональный уровень нервной системы<br>Functional level of the nervous system                                    | 2.04 ± 0.02                         | 1.99 ± 0.02     | 2.33 ± 0.01           | 2.26 ± 0.02     | 2.41 ± 0.02           | 2.32 ± 0.02      |
| Устойчивость нервной реакции<br>Stability of nervous response                                                       | 0.85 ± 0.06                         | 0.85 ± 0.05     | 1.27 ± 0.05           | 1.06 ± 0.05**   | 1.35 ± 0.08           | 1.23 ± 0.08      |
| Уровень функциональных возможностей сформированной системы<br>Level of functional capabilities of the formed system | 1.83 ± 0.07                         | 1.81 ± 0.06     | 2.39 ± 0.06           | 2.15 ± 0.06**   | 2.52 ± 0.09           | 2.36 ± 0.09      |

Примечание. Здесь и в табл. 4: \* —  $p \leq 0,05$  при сравнении данных мальчиков и девочек 1-й группы; \*\* —  $p \leq 0,05$  при сравнении данных мальчиков и девочек 2-й группы; \*\*\* —  $p \leq 0,05$  при сравнении данных юношей и девушек 3-й группы.

Note: Here and in Table 4: \* —  $p \leq 0.05$  when comparing the data of boys and girls in the 1<sup>st</sup> group; \*\* —  $p \leq 0.05$  when comparing the data of boys and girls in the 2<sup>nd</sup> group; \*\*\* —  $p \leq 0.05$  when comparing the data of boys and girls in the 3<sup>rd</sup> group.

Таблица 3 / Table 3

**Показатели функционального состояния сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем учащихся обследуемых групп**  
**Indicators of the functional state of the cardiovascular system and autonomic nervous system in students in three studied groups**

| Показатель<br>Indicator                                    | Обследуемые группы   Studied groups |                       |                       |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                            | 1-я   1 <sup>st</sup>               | 2-я   2 <sup>nd</sup> | 3-я   3 <sup>rd</sup> |
| ЧСС, уд. в 1 мин   HR, bpm                                 | 87.62 ± 0.8*                        | 80.76 ± 0.85          | 80.88 ± 2.56***       |
| Мх, мс   ms                                                | 807.77 ± 9.15*                      | 882.39 ± 11.81        | 900.71 ± 20.34***     |
| Мп, мс   ms                                                | 565.66 ± 5.36*                      | 636.92 ± 7.4          | 654.69 ± 13.7***      |
| Вариационный размах, мс   Variational range, ms            | 254.4 ± 10.07                       | 252.67 ± 5.54         | 248.8 ± 11.45         |
| Мощность TP, мс <sup>2</sup>   Power TP, ms <sup>2</sup>   | 3667.8 ± 470.09                     | 4369.53 ± 1040.83     | 4102.88 ± 1142.04     |
| Мощность HF, мс <sup>2</sup>   HF power, ms <sup>2</sup>   | 1169.74 ± 77.86                     | 1163.56 ± 108.05      | 1124.82 ± 153.1       |
| Мощность LF, мс <sup>2</sup>   LF power, ms <sup>2</sup>   | 1319.3 ± 184.64                     | 1236.27 ± 109.57      | 1003.29 ± 148.37      |
| Мощность VLF, мс <sup>2</sup>   VLF power, ms <sup>2</sup> | 695.99 ± 147.17                     | 522.96 ± 55.41        | 521.14 ± 87.99        |
| Мощность ULF, мс <sup>2</sup>   ULF power, ms <sup>2</sup> | 467.32 ± 125.23                     | 518.35 ± 50.17        | 485.89 ± 83.29        |
| МхRMn                                                      | 1.42 ± 0.01                         | 1.4 ± 0.01            | 1.39 ± 0.02           |
| pNN50, %                                                   | 27.98 ± 1.25                        | 30.6 ± 1.56           | 28.41 ± 2.7           |
| RMSSD, мс   ms                                             | 50.93 ± 1.59                        | 53.78 ± 1.96          | 52.79 ± 3.55          |
| Среднее отклонение RR, мс   Avg. dev. RR, ms               | 52.58 ± 1.26                        | 54.96 ± 1.53          | 53.47 ± 2.86          |
| Коэффициент вариации, %   Coefficient of variation, %      | 8.56 ± 0.58*                        | 7.16 ± 0.16           | 8.13 ± 1.31           |
| Мо, мс   ms                                                | 684.1 ± 6.41*                       | 756.18 ± 8.52         | 763.71 ± 18.34***     |
| Амплитуда моды, %   Mode amplitude, %                      | 39.03 ± 0.76                        | 37.53 ± 0.84          | 38.52 ± 1.65          |
| Стресс-индекс   Stress index                               | 155.47 ± 14.26                      | 128.96 ± 8.05         | 137.1 ± 13.08         |
| Мощность HF, %   HF power, %                               | 42.26 ± 1.14                        | 39.51 ± 1.23          | 43.06 ± 2.45          |
| Мощность LF, %   LF power, %                               | 38.33 ± 0.86*                       | 41.64 ± 0.97**        | 37.01 ± 1.84          |
| Мощность VLF, мс <sup>2</sup>   VLF power, ms <sup>2</sup> | 691.2 ± 146.87                      | 503.41 ± 45.91        | 521.15 ± 87.99        |
| LF/HF                                                      | 1.26 ± 0.08                         | 1.46 ± 0.08           | 1.25 ± 0.14           |
| Индекс централизации   Centralization index                | 2.17 ± 0.22                         | 2.22 ± 0.15           | 2.0 ± 0.21            |
| AVNN, мс   ms                                              | 689.53 ± 6.68*                      | 754.27 ± 8.46         | 771.15 ± 17.67***     |
| SDE, мс   ms                                               | 3.43 ± 0.11                         | 3.72 ± 0.13           | 4.15 ± 0.53           |
| SDSD, мс   ms                                              | 51.06 ± 1.6                         | 53.84 ± 1.97          | 52.92 ± 3.56          |

Таблица 4 / Table 4

**Интегральные показатели функционального состояния вегетативной нервной системы учащихся обследуемых групп (условные единицы)**  
**Integral indicators of the functional state of the autonomic nervous system in the studied groups of students (conventional units)**

| Показатель<br>Indicator                                                                              | Обследуемые группы   Studied groups |                 |                       |                  |                       |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------|
|                                                                                                      | 1-я   1 <sup>st</sup>               |                 | 2-я   2 <sup>nd</sup> |                  | 3-я   3 <sup>rd</sup> |                 |
|                                                                                                      | Мальчики   Boys                     | Девочки   Girls | Мальчики   Boys       | Девочки   Girls  | Юноши   Young men     | Девушки   Women |
| Показатель адекватности процессов регуляции<br>The indicator of the adequacy of regulatory processes | 5.7 ± 0.15                          | 5.98 ± 0.12     | 5.47 ± 0.12           | 5.66 ± 0.13      | 5.79 ± 0.21           | 5.46 ± 0.12     |
| Индекс вегетативного равновесия<br>Index of vegetative equilibrium                                   | 191.52 ± 12.46                      | 187.37 ± 11.02  | 179.52 ± 9.18         | 229.66 ± 15.52** | 174.11 ± 16.12        | 196.01 ± 12.27  |
| Вегетативный показатель ритма сердца<br>Vegetative heart rate indicator                              | 6.69 ± 0.28                         | 6.83 ± 0.25     | 6.12 ± 0.22           | 7.17 ± 0.33**    | 5.59 ± 0.34           | 6.52 ± 0.32***  |
| Индекс напряжения<br>Stress index                                                                    | 145.44 ± 10.43                      | 145.45 ± 9.69   | 129.06 ± 8.03         | 171.68 ± 13.85** | 119.57 ± 12.67        | 138.08 ± 9.71   |

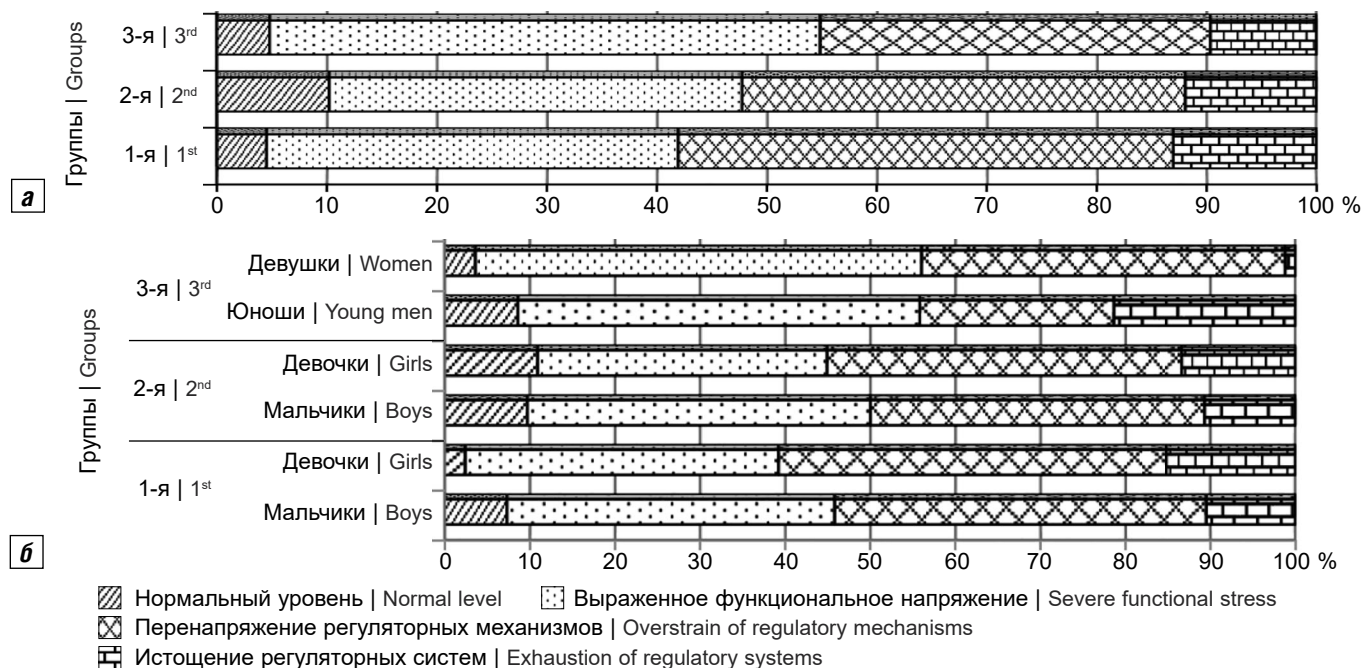


Рис. 3. Распределение учащихся обследуемых групп в зависимости от уровня функциональных резервов (а), в том числе с учётом гендерной принадлежности (б) (%).

Fig. 3. Distribution of students in the study groups according to the level of functional reserves (a), including gender (б) (%).

Таблица 5 / Table 5

Уровень тревожности, познавательной активности и негативных эмоциональных переживаний учащихся обследуемых групп, баллы  
The level of anxiety, cognitive activity, and adverse emotional experiences in students of the studied groups, points

| Показатель<br>Indicator                                                        |                                                    | Обследуемые группы   Studied groups |                       |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                                                |                                                    | 1-я   1 <sup>st</sup>               | 2-я   2 <sup>nd</sup> | 3-я   3 <sup>rd</sup> |
| Тревожность<br>Anxiety                                                         | в повседневной деятельности / in daily activities  | 17.38 ± 0.33*                       | 29.29 ± 1.73          | 30.6 ± 3.06***        |
|                                                                                | в учебной деятельности / in educational activities | 18.06 ± 0.36*                       | 27.53 ± 1.36          | 28.48 ± 2.5***        |
| Познавательная<br>активность<br>Cognitive activity                             | в повседневной деятельности / in daily activities  | 30.0 ± 0.39                         | 31.4 ± 1.18           | 29.34 ± 0.7           |
|                                                                                | в учебной деятельности / in educational activities | 29.19 ± 0.37                        | 29.99 ± 1.14          | 27.46 ± 0.72          |
| Негативные<br>эмоциональные<br>переживания<br>Adverse emotional<br>experiences | в повседневной деятельности / in daily activities  | 18.64 ± 0.39*                       | 28.84 ± 1.59          | 32.27 ± 2.72***       |
|                                                                                | в учебной деятельности / in educational activities | 13.11 ± 0.34*                       | 23.65 ± 1.66          | 25.76 ± 2.9***        |

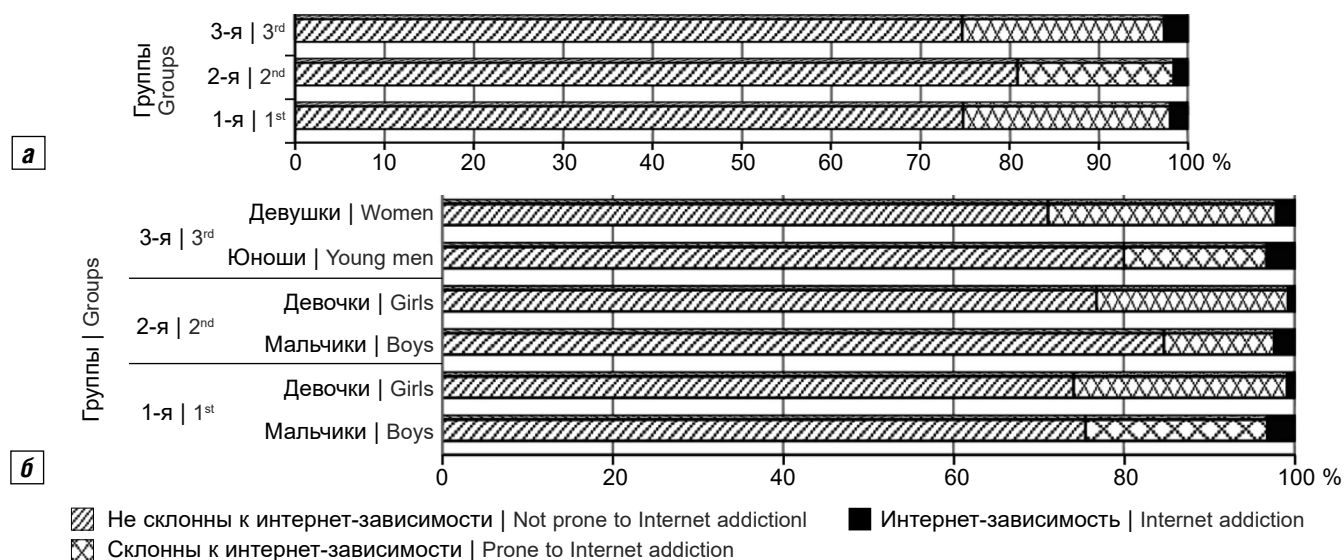


Рис. 4. Распределение учащихся обследуемых групп в зависимости от уровня интернет-зависимости (а), в том числе с учётом гендерной принадлежности (б) (%).

Fig. 4. Distribution of students in the examined groups in dependence on the level of internet addiction (a), taking into account gender identity (б) (%).

и 13,4% против 10,7% соответственно), в то время как в 3-й группе — у 21,4% юношей и лишь у 1,2% девушек были определены низкие функциональные резервы.

Уровень стресса, испытываемого учащимися при длительной работе с электронными средствами, был наибольшим у старшеклассников (3-я группа исследования) при длительности работы с электронными средствами более 11 ч в сутки (у девушек —  $86,46 \pm 3,34$  балла, у юношей —  $68,43 \pm 3,76$  балла;  $p \leq 0,05$ ), а также у учащихся 2-й группы, использующих различные электронные устройства, —  $7,41$  ч в сутки ( $83 \pm 2,99$  балла у девочек и  $61,73 \pm 2,42$  балла у мальчиков;  $p \leq 0,05$ ).

В условиях длительного воздействия различных электронных средств установлено, что с увеличением времени использования у учащихся нарастает уровень тревожности и негативных эмоциональных переживаний как в учебной, так и в повседневной деятельности. Так, анализ данных, представленных в табл. 5, показал, что с увеличением времени работы с электронными средствами у учащихся 3-й группы по сравнению с данными учащихся 1-й группы на 76% повышалась тревожность в повседневной жизни и на 57,7% — в учебной деятельности, а уровень негативных эмоциональных переживаний — на 73,1 и 96,5% соответственно при познавательной активности примерно одного уровня.

Важно акцентировать внимание на научном подтверждении развития интернет-зависимости при длительном использовании ЭСО. Показано, что наибольший процент учащихся с интернет-зависимостью был в 3-й группе (2,7%); учащихся, склонных к интернет-зависимости, — также в 3-й группе (22,7%) и в 1-й группе (23,3%) (рис. 4). При этом выявлены гендерные особенности формирования интернет-зависимости: большая склонность к её развитию у мальчиков по сравнению с девочками в начальном звене (3,2 и 0,9% соответственно) и в среднем звене (2,4 и 0,8% соответственно).

## Обсуждение

Активное внедрение информационно-коммуникационных технологий происходит посредством взаимодействия учащихся с электронными средствами обучения [1–4], среднее время использования которых, по данным различных авторов, может составлять от 5 до 7 ч в сутки [5–7]. Полученные данные дополнили существующие публикации и конкретизировали среднее время работы с электронными средствами в течение суток: учащиеся начальной школы затрачивают 5,27 ч; учащиеся среднего звена обучения — 7,41 ч, старшеклассники — 11,5 ч. Также установлено, что время работы с электронными средствами обучения в учебной деятельности было наибольшим у учащихся старшего звена (54,1% от общего времени учебной нагрузки), тогда как у учащихся начального и среднего звеньев — 28,1 и 30,6% соответственно. Подтверждено, что центральная нервная система и вегетативная нервная система являются органами-мишенями при работе с электронными средствами, обеспечивая разную ответную реакцию организма в зависимости от времени работы с ЭСО: развитие неустойчивости нервной реакции; изменение типа регуляции сердечного ритма с преобладанием симпатической и центральной регуляции при снижении активности автономного контура; напряжение работы регуляторных систем и истощение функциональных резервов.

Наибольший стресс выявлен у старшеклассников, которые более 11,5 ч в сутки работают с электронными средствами, что приводит к повышению уровня тревожности (по сравнению с данными младших школьников — на 76% в повседневной и на 57,7% в учебной деятельности), негативных эмоциональных переживаний (на 73,1 и 96,5% соответственно), а также обуславливает развитие интернет-зависимости. По ряду показателей полученные результаты согласуются с данными Семеновой Н.Б. и соавт., Куприянчук Е.В. и соавт., Болдыревой М.Г. и соавт., Волковой Е.Н. и соавт. [27–30].

Результаты проведённого исследования подтвердили изменения на донозологическом уровне показателей физического и психического здоровья учащихся начальных, средних и старших классов, работающих с электронными средствами. Полученные данные расширяют знания в области гигиены и определяют механизмы формирования безопасного уровня жизнедеятельности учащихся в условиях цифровой образовательной среды, а также обосновывают необходимость практического внедрения системы профилактических мероприятий, направленных на снижение неблагоприятного влияния электронных средств обучения, важность скрининга донозологической диагностики и использования здоровьесберегающих технологий повышения резервных возможностей организма учащихся.

## Заключение

1. Учащиеся инновационных образовательных организаций работают с электронными средствами обучения от 28,1% общего времени учебной нагрузки в неделю в начальной школе до 54,1% в старшем звене; тратят на это в сутки 5,27 ч в начальной школе, 7,41 ч в средней и 11,5 ч в старшем звене обучения.

2. В зависимости от длительности взаимодействия учащихся с электронными средствами обучения установлена ответная реакция организма в виде развития неустойчивости нервной реакции, изменения типа регуляции сердечного ритма с преобладанием симпатической регуляции на фоне снижения активности автономного контура, напряжения работы регуляторных систем и истощения функциональных резервов, которые имели наиболее выраженный характер у старшеклассников, длительно работающих с ЭСО.

3. При работе с электронными средствами обучения наибольший уровень стресса выявлен у старшеклассников, причём у девушек он был в 1,3 раза выше по сравнению с юношами, что приводило к нарастанию уровня тревожности и негативных эмоциональных переживаний как в учебной, так и в повседневной деятельности, а также к развитию интернет-зависимости у 2,7% учащихся и склонности к интернет-зависимости — у 22,7% учащихся.

4. Полученные данные об особенностях изменения психофизиологического статуса учащихся в зависимости от возраста, ступени обучения (учебной нагрузки) и времени работы с электронными средствами являются фундаментом для разработки профилактических мероприятий по снижению риска воздействия электронных средств и коррекции изменений функционирования основных систем организма, что позволяет повысить эффективность профилактики развития школьно-обусловленных болезней.

## Литература

1. Сетко Н.П. Современные аспекты безопасности жизнедеятельности детей и подростков в цифровой среде: обзор литературы. *Оренбургский медицинский вестник*. 2023; 11(3): 18–25. <https://elibrary.ru/hiumjmr>
2. Камилова Р.Т., Курбанбаева А.Ж., Камилов Ж.А., Исакова И.Л. Характеристика цифровых устройств и их использование в современных условиях детьми школьного возраста. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(9): 968–74. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-968-974> <https://elibrary.ru/ibkxtk>
3. Александрова И.Э. Гигиеническая оптимизация учебного процесса в школе в условиях использования электронных средств обучения. *Анализ риска здоровью*. 2020; (2): 47–54. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.2.05> <https://elibrary.ru/pplcbu>
4. Сетко Н.П., Лукьянов С.Э. Сравнительная характеристика функциональных резервов организма школьников начального и среднего звена в условиях цифровой среды. В кн.: *Профилактическая медицина — 2023: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. СПб.; 2023: 267–72. <https://elibrary.ru/ggkcpk>
5. Шубочкина Е.И., Иванов В.Ю., Чепрасов В.В., Айзатова М.В. Гигиеническая оценка влияния факторов цифровой среды на организм подростков в процессе образовательной и досуговой деятельности.

- Здоровье населения и среда обитания — ЗНISO. 2021; 29(6): 71–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-339-6-71-77> <https://elibrary.ru/ukfkwb>
6. Смирнова Н.А. Цифровая образовательная среда в современной школе. В кн.: *Цифровая образовательная среда: инновации и практики: Сборник трудов участников конференции*. СПб.; 2022: 9–12. <https://xtern.ru/upload/iblock/2d3/2d3acb502feb6b56912d6d3fab8fe655.pdf>
  7. Скоблина Н.А., Попов В.И., Еремин А.Л., Маркелова С.В., Милушкина О.Ю., Обрубов С.А. и др. Риски развития болезней глаза и его придаточного аппарата у обучающихся в условиях нарушения гигиенических правил использования электронных устройств. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(3): 279–84. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-279-284> <https://elibrary.ru/niuyep>
  8. Маркелова С.В., Меттини Э., Татарничек А.А. и др. Режим использования мобильных электронных устройств обучающимися как фактор риска развития отклонений со стороны органа зрения. *Российский вестник гигиены*. 2022; (2): 30–6. <https://doi.org/10.24075/rbh.2022.047> <https://elibrary.ru/peoufz>
  9. Богомолова Е.С., Бадеева Т.В., Котова Н.В., Максименко Е.О., Олюшина Е.А., Лангуев К.А. Гигиенические аспекты дистанционного образования обучающихся. *Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья*. 2020; (3): 35–8. <https://elibrary.ru/rhahdg>
  10. Богомолова Е.С., Лангуев К.А., Котова Н.В. Некоторые аспекты состояния здоровья учащихся в связи с применением дистанционных образовательных технологий. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(3): 317–22. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-317-322> <https://elibrary.ru/zxyfre>
  11. Галузо И.В. Нужны ли мобильные устройства в учебном процессе? *Современное образование Витебщины*. 2020; (1): 26–35. <https://elibrary.ru/cxyezt>
  12. Кучма В.Р., Соколова С.Б., Рапопорт И.К., Чубаровский В.В. Влияние поведенческих факторов риска на формирование отклонений в состоянии здоровья обучающихся. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(10): 1206–13. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1206-1213> <https://elibrary.ru/odyvft>
  13. Сетко Н.П., Булычева Е.В., Жданова О.М. Особенности становления функционального состояния центральной нервной системы и когнитивных способностей у детей и подростков школьного возраста. *Педагогика*. 2020; (1): 76–9. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-1-76-79> <https://elibrary.ru/irpeif>
  14. Гончарова Г.А. Нервно-психическое здоровье детей — активных пользователей цифровых средств. *Российский вестник гигиены*. 2021; (3): 33–5. <https://doi.org/10.24075/rbh.2021.017> <https://elibrary.ru/gkhrnh>
  15. Вятлева О.А. Влияние использования смартфонов на самочувствие, когнитивные функции и морфофункциональное состояние центральной нервной системы у детей и подростков (обзор литературы). *Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья*. 2020; (1): 4–11. <https://elibrary.ru/zpmqwa>
  16. Филькина О.М., Воробьева Е.А., Долотова Н.В., Кочерова О.Ю., Милушкина А.И. Длительность использования цифровых устройств как один из факторов риска развития миопии у школьников. *Анализ риска здоровью*. 2020; (4): 76–83. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.08> <https://elibrary.ru/cnkpkuk>
  17. Дутко Ю.А., Беловая Е.В. Особенности формирования мышления личности в цифровой среде (сравнительный анализ поколений). *Научный результат. Педагогика и психология образования*. 2020; 6(1): 78–92. <https://doi.org/10.18413/2313-8971-2020-6-1-0-77> <https://elibrary.ru/afzgi>
  18. Сетко Н.П., Жданова О.М., Лукьянов С.Э., Мокеева М.М., Бейлина Е.Б., Закурдаева Е.А. и др. К вопросу формирования тревожности среди учащихся начального звена и ее профилактики в условиях современного образовательного процесса. *Оренбургский медицинский вестник*. 2024; 12(1): 56–62. <https://elibrary.ru/fnzexz>
  19. Сетко Н.П., Лукьянов С.Э. Особенности вегетативного статуса у младших школьников в условиях действия факторов цифровой среды. В кн.: *Современные аспекты здоровьесбережения: сборник материалов юбилейной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию медико-профилактического факультета УО «БГМУ»*. Минск; 2024: 125–31.
  20. Богомолова Е.С., Котова Н.В., Лангуев К.А. Клиповое мышление у современных детей и подростков: формирование и пути преодоления. *Педагогическое образование: новые вызовы и цели*. 2021; (1): 117–25. <https://elibrary.ru/aktpo>
  21. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013; 310(20): 2191–4. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
  22. Сепетлиев Д.А. *Статистические методы в научных медицинских исследованиях*. М.: Медицина; 1968.
  23. Мороз М.П. *Экспресс-диагностика работоспособности и функционального состояния человека: Рекомендации по допуску к работе*. СПб.: ИМАТОН; 2017.
  24. Водопьянова Н.Е. *Психодиагностика стресса*. СПб.: Питер; 2009: 31–3. <https://elibrary.ru/qxvsdn>
  25. Андреева А.Д. Диагностика эмоционального отношения к учению в среднем и старшем школьном возрасте. Научно-методические основы использования в школьной психологической службе конкретных психодиагностических методик. М.; 1988.
  26. Жичкина А.Е. О возможностях психологических исследований в сети Интернет. *Психологический журнал*. 2000; 21(2): 75–8. [https://psychology.ru/internet/Psychological\\_Journal/02\\_2000\\_02.stm](https://psychology.ru/internet/Psychological_Journal/02_2000_02.stm)
  27. Болдырева М.Г., Соколова С.Б. Особенности образа жизни и самочувствия подростков 15–18 лет Московской области с проблемным использованием социальных сетей. *Медицина труда и экология человека*. 2024; (2): 110–24. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10208> <https://elibrary.ru/yfwqny>
  28. Волкова Е.Н., Сорокоумова Г.В. Экранное время, цифровая грамотность и психологическое благополучие современных подростков. *Мир психологии*. 2025; 3(122): 98–110. <https://elibrary.ru/uomlob>
  29. Куприянчук Е.В., Ладухина М.В., Лисовцева В.М. Индивидуально-психологические особенности подростков с интернет-зависимостью. *Мир науки. Педагогика и психология*. 2022; 10(4): 42. <https://elibrary.ru/davsov>
  30. Семёнова Н.Б., Терещенко С.Ю., Эверт Л.С., Зайцева О.И., Шубина М.В. Распространенность интернет-зависимости у подростков Центральной Сибири. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2020; 64(1): 36–44. <https://elibrary.ru/fuiybb>

## References

1. Setko N.P., Lukyanov S.E. Features of the influence of electromagnetic fields on human and animal health and modern principles of rationing: literature review. *Orenburgskii meditsinskii vestnik*. 2023; 11(3): 18–25. <https://elibrary.ru/hiumjr> (in Russian)
2. Kamilova R.T., Kurbanbaeva A.Zh., Kamilov Zh.A., Isakova L.I. Characteristics of digital devices and their use by school children in modern conditions. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(9): 968–74. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-968-974> <https://elibrary.ru/ibkxtk> (in Russian)
3. Aleksandrova I.E. Hygienic optimization of educational process at school involving massive use of electronic learning devices. *Analiz riska zdorov'yu*. 2020; (2): 47–54. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.2.05> <https://elibrary.ru/pplcub> (in Russian)
4. Setko N.P., Lukyanov S.E. Comparative characteristics of the functional reserves of the body of primary and secondary schoolchildren in the digital environment. In: *Preventive Medicine — 2023: Collection of Scientific Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Profilakticheskaya meditsina — 2023: sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. St. Petersburg; 2023: 267–72. <https://elibrary.ru/ggkcpb> (in Russian)
5. Shubochkina E.I., Ivanov V.Yu., Cheprasov V.V., Azyratova M.V. Hygienic assessment of the influence of factors of digital environment on adolescents in the process of educational and leisure activities. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya — ZNiSO*. 2021; 29(6): 71–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-339-6-71-77> <https://elibrary.ru/ukfkwb> (in Russian)
6. Smirnova N.A. Digital educational environment in a modern school. In: *Digital Educational Environment: Innovations and Practices: Proceedings of the Conference Participants [Tsifrovaya obrazovatel'naya sreda: innovatsii i praktiki: Sbornik trudov uchastnikov konferentsii]*. St. Petersburg; 2022: 9–12. <https://xtern.ru/upload/iblock/2d3/2d3acb502feb6b56912d6d3fab8fe655.pdf> (in Russian)
7. Skoblina N.A., Popov V.I., Eryomin A.L., Markelova S.V., Milushkina O.Yu., Obrubov S.A., et al. Risks of developing diseases of an eye and its adnexa in students in conditions of the violation of hygienic rules for the use of electronic devices. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(3): 279–84. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-279-284> <https://elibrary.ru/niuyep> (in Russian)
8. Markelova S.V., Mettini E., Tatarinchik A.A., Ievleva O.V. Regime of using mobile electronic devices by students as a risk factor of vision impairment. *Rossiiskii vestnik gigieny*. 2022; (2): 30–6. <https://doi.org/10.24075/rbh.2022.047> <https://elibrary.ru/peoufz> (in Russian)
9. Bogomolova E.S., Badeeva T.V., Kotova N.V., Maksimenko E.O., Olyushina E.A., Languev K.A. Hygienic aspects of distance education. *Voprosy shkol'noi i universitetskoi meditsiny i zdorov'ya*. 2020; (3): 35–8. <https://elibrary.ru/rhahdg> (in Russian)
10. Bogomolova E.S., Languev K.A., Kotova N.V. Some aspects of the state of student health in connection with the use of distance education technologies. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(3): 317–22. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-317-322> <https://elibrary.ru/zxyfre> (in Russian)
11. Galuzo I.V. Are mobile devices needed in the educational process? *Sovremennoe obrazovanie Vitebschiny*. 2020; (1): 26–35. <https://elibrary.ru/cxyezt> (in Russian)
12. Kuchma V.R., Sokolova S.B., Rapoport I.K., Chubarovsky V.V. The influence of behavioral risk factors on outcomes of students' health. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(10): 1206–13. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1206-1213> <https://elibrary.ru/odyvft> (in Russian)
13. Setko N.P., Bulychева E.V., Zhdanova O.M. Features of formation of the functional state of the central nervous system and cognitive abilities in children and adolescents of the school age. *Pedagogika*. 2020; (1): 76–9. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-1-76-79> <https://elibrary.ru/irpeif> (in Russian)
14. Goncharova G.A. Mental health of the children who are active users of digital media. *Rossiiskii vestnik gigieny*. 2021; (3): 33–5. <https://doi.org/10.24075/rbh.2021.017> <https://elibrary.ru/gkhrnh> (in Russian)
15. Vyatleva O.A. Influence of use of smartphones on well-being, cognitive functions and morphofunctional state of the central nervous system in children and adolescents (review). *Voprosy shkol'noi i universitetskoi meditsiny i zdorov'ya*. 2020; (1): 4–11. <https://elibrary.ru/zpmqwa> (in Russian)

## Original article

16. Filkina O.M., Vorobyova E.A., Dolotova N.V., Kocherova O.Yu., Malysheva A.I. Long use of digital devices as a risk factor that causes myopia occurrence in schoolchildren. *Health Risk Analysis*. 2020; (4): 76–83. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.4.08>. <https://elibrary.ru/tcfart>
17. Dutko Ju.A., Belovol E.V. Features of formation thinking in the digital environment (comparative analysis of generations). *Nauchnyi rezul'tat. Pedagogika i psikhologiya obrazovaniya*. 2020; 6(1): 78–92. <https://doi.org/10.18413/2313-8971-2020-6-1-0-7> <https://elibrary.ru/afzgi> (in Russian)
18. Setko N.P., Zhdanova O.M., Lukyanov S.E., Moiseeva M.M., Beilina E.B., Zakurdaeva E.A., et al. On the issue of the formation of anxiety and its prevention in the conditions of the modern educational process. *Orenburgskii meditsinskii vestnik*. 2024; 12(1): 56–62. <https://elibrary.ru/fnzexz> (in Russian)
19. Setko N.P., Luk'yanov S.E. Features of the vegetative status in primary schoolchildren under the influence of digital environment factors. In: *Modern Aspects of Health Preservation: Proceedings of the Anniversary Scientific-Practical Conference with International Participation Dedicated to the 60th Anniversary of the Medical Preventive Faculty of BSMU [Sovremennye aspekty zdorov'esbezheniya: sbornik materialov yubileinoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 60-letiyu mediko-profilakticheskogo fakul'teta UO «BGMU»]*. Minsk; 2024: 125–31. (in Russian)
20. Bogomolova E.S., Kotova N.V., Langueta E.V. Clip thinking of children and adolescents today: development and ways of coping. *Pedagogicheskoe obrazovanie: novye vyzovy i tseli*. 2021; (1): 117–25. <https://elibrary.ru/aktpo> (in Russian)
21. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013; 310(20): 2191–4. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
22. Sepetlev D.A. *Statistical Methods in Scientific Medical Research [Statisticheskie metody v nauchnykh meditsinskikh issledovaniyakh]*. Moscow: Meditsina; 1968. (in Russian)
23. Moroz M.P. *Express Diagnostics of Human Performance and Functional State: Recommendations for Work Admission [Ekspress-diagnosticska rabotosposobnosti i funktsional'nogo sostoyaniya cheloveka: rekomendatsii po dopusku k rabote]*. St. Petersburg: IMATON; 2017. (in Russian)
24. Vodop'yanova N.E. *Psychodiagnostics of Stress [Psikhodiagnostika stressa]*. St. Petersburg: Piter; 2009: 31–3. <https://elibrary.ru/qxvsn> (in Russian)
25. Andreeva A.D. *Diagnostics of Emotional Attitude to Learning in Middle and High School Age. Scientific and Methodological Foundations of Using Specific Psychodiagnostic Techniques in School Psychological Services Diagnostika emotsional'nogo otosheniya k ucheniyu v srednem i starshem shkol'nom vozraste. [Nauchno-metodicheskie osnovy ispol'zovaniya v shkol'noi psikhologicheskoi sluzhbe konkretnykh psikhodiagnosticheskikh metodik]*. Moscow; 1988. (in Russian)
26. Zhichkina A.E. On the possibilities of psychological research on the Internet. *Psikhologicheskii zhurnal*. 2000; 21(2): 75–8. Available at: [https://www.psychology.ru/internet/Psychological\\_Journal/02\\_2000\\_02.stm](https://www.psychology.ru/internet/Psychological_Journal/02_2000_02.stm) (in Russian)
27. Boldyreva M.G., Sokolova S.B. The lifestyle and well-being of the Moscow region adolescents between the ages of 15 and 18 years with the problematic social media use. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024; (2): 110–24. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10208> <https://elibrary.ru/yfwqny> (in Russian)
28. Volkova, E.N., Sorokoumova, G.V. Screen time, digital literacy, and psychological well-being of modern adolescents. *Mir Psikhologii*. 2025; 3(122): 98–110. <https://elibrary.ru/uomlob> (in Russian)
29. Kuprianchuk E.V., Ladukhina M.V., Lisovtseva V.M. Individual psychological characteristics of adolescents with Internet addiction. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya*. 2022; 10(4): 42. <https://elibrary.ru/davsov>
30. Semenova N.B., Tereshchenko S.Yu., Evert L.S., Zaitseva O.I., Shubina M.V. Prevalence of internet-addiction among adolescents of Central Siberia. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*. 2020; 64(1): 36–44. <https://elibrary.ru/fuiybb> (in Russian)

## Сведения об авторах

**Сетко Нина Павловна**, доктор мед. наук, профессор, гл. науч. сотр. ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Москва, Россия. E-mail: [nina.setko@gmail.com](mailto:nina.setko@gmail.com)

**Лукьянов Сергей Эдуардович**, аспирант каф. профилактической медицины ФГБОУ ВО ОрГМУ Минздрава России, 460014, Оренбург, Россия. E-mail: [c\\_luk\\_10@mail.ru](mailto:c_luk_10@mail.ru)

**Сетко Андрей Геннадьевич**, доктор мед. наук, профессор, зав. отд. гигиены питания ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Москва, Россия. E-mail: [a\\_isetko@mail.ru](mailto:a_isetko@mail.ru)

**Жданова Олеся Михайловна**, канд. мед. наук, ассистент каф. профилактической медицины ФГБОУ ВО ОрГМУ Минздрава России, 460014, Оренбург, Россия. E-mail: [Robokors@yandex.ru](mailto:Robokors@yandex.ru)

## About the authors

**Nina P. Setko**, DSc (Medicine), Professor, chief researcher, Federal Scientific Center for Hygiene named after F.F. Erisman, Moscow, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8073-0614> E-mail: [nina.setko@gmail.com](mailto:nina.setko@gmail.com)

**Sergey E. Lukyanov**, postgraduate student, Department of Preventive Medicine, Orenburg State Medical University, Orenburg, 460014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3369-2886> E-mail: [c\\_luk\\_10@mail.ru](mailto:c_luk_10@mail.ru)

**Andrey G. Setko**, DSc (Medicine), professor, head, Department of Food Hygiene of the Federal Scientific Center for Hygiene named after F.F. Erisman, Moscow, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9724-8672> E-mail: [a\\_isetko@mail.ru](mailto:a_isetko@mail.ru)

**Olesya M. Zhdanova**, PhD (Medicine), assistant, Department of Preventive Medicine, Orenburg State Medical University, Orenburg, 460014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4694-0674> E-mail: [Robokors@yandex.ru](mailto:Robokors@yandex.ru)



Якимова Н.Л., Новиков М.А., Скрынник А.С., Лизарев А.В.

## Оценка нейротропности нанокompозита оксида железа (II, III) в динамике постконтактного периода по изменению показателей электроэнцефалографии и поведенческих реакций у крыс

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Наночастицы (НЧ) оксида железа широко применяются в медицине, но механизмы их токсичности не вполне изучены. Способность НЧ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  накапливаться в нервной системе (НС) требует исследования отдалённых нейротоксических эффектов.

**Цель исследования** — оценка нейротоксичности нанокompозита (НК) оксида железа, инкапсулированного в матрицу арабиногалактана (АГ), в динамике постконтактного периода по изменению показателей электроэнцефалографии (ЭЭГ) и поведенческих реакций у крыс-самцов.

**Материалы и методы.** Эксперимент выполнен на беспородных половозрелых белых крысах-самцах ( $n = 60$ ). Опытным группам в течение 10 дней в желудок вводили НК в дозах 500 мкг/кг ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 500}$ ) и 5000 мкг/кг ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$ ) массы тела. Контрольные группы получали 0,5 мл 0,9% NaCl. Поведение крыс изучали по методу «открытого поля» в установке EthoStudio. Запись и анализ ЭЭГ у животных выполняли с помощью прибора «Нейрон-Спектр-1/В» (Россия). Обследовали крыс сразу и через 6 мес после окончания экспозиции.

**Результаты.** В раннем постконтактном периоде в группе  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$  увеличился пройденный путь по сравнению с интактными животными. В 1-м сроке у особей группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 500}$  в отведении Fp1-A1 возросла средняя мощность ритмов альфа- и бета-1 относительно контрольной группы. У крыс сразу после получения НК в дозах 500 и 5000 мкг/кг в отведении C3-A1 по сравнению с контролем по индексу ритмов отмечено увеличение дельта-ритма, снижение тета- и альфа-ритмов. Через 6 мес у особей группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$  уменьшилось количество стоек с упором по сравнению с группой контроля. В отдалённом периоде в опытных группах в отведении Fp1-A1 более информативным было снижение средней амплитуды дельта- и тета-ритмов относительно контрольной группы. Амплитуда тета-ритма в группе  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 500}$  также была ниже, чем у группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$ .

**Ограничения исследования.** Исследование ограничивалось изучением поведенческих реакций в «открытом поле» и показателей ЭЭГ у самцов белых крыс сразу после 10-дневного введения НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  в дозах 500 и 5000 мкг/кг и после 6 мес постконтактного периода.

**Заключение.** В динамике постконтактного периода НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  в дозах 500 и 5000 мкг/кг вызывал у крыс дозозависимые изменения поведенческих реакций и ЭЭГ, что требует дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** нанокompозит; оксид железа; арабиногалактан; поведение; ЭЭГ

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение № 8 от 15.12.2023 г.), проведено с соблюдением международных стандартов Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123), и требований GLP.

**Для цитирования:** Якимова Н.Л., Новиков М.А., Скрынник А.С., Лизарев А.В. Оценка нейротропности нанокompозита оксида железа (II, III) в динамике постконтактного периода по изменению показателей электроэнцефалографии и поведенческих реакций у крыс. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1036–1042. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1036-1042> <https://elibrary.ru/kleumf>

**Для корреспонденции:** Якимова Наталья Леонидовна, e-mail: [ynl-77@list.ru](mailto:ynl-77@list.ru)

**Вклад авторов:** Якимова Н.Л. — сбор и обработка материала, регистрация и описание ЭЭГ, написание текста, редактирование; Новиков М.А. — концепция и дизайн исследования, выполнение затравок животных, редактирование; Скрынник А.С. — сбор и обработка материала, описание результатов по изучению поведения; Лизарев А.В. — сбор материала, регистрация ЭЭГ, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность Соседовой Л.М., доктору мед. наук, профессору за консультативную помощь, редактирование статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания, не имело дополнительных источников финансовой поддержки.

Поступила: 20.04.2026 / Поступила после доработки: 10.07.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Natalya L. Yakimova, Mikhail A. Novikov, Anna S. Skrynnik, Aleksander V. Lizarev

## Evaluation of the neurotropism of iron (II, III) oxide nanocomposite in the course of the post-exposure period, based on changes in electroencephalography parameters and behavioral reactions in rats

East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Iron oxide nanoparticles (NPs) are widely used in medicine. However, the mechanisms of their toxicity are not fully understood. In particular, due to their ability to accumulate in the nervous system (NS), it is necessary to investigate their remote neurotoxic effects.

**The aim** of the study was to evaluate the neurotoxicity of an iron oxide nanocomposite (NC) encapsulated in an arabinogalactan (AG) matrix over the post-exposure period, based on changes in electroencephalography (EEG) parameters and behavioral responses in male rats.

**Materials and methods.** The experiment was performed on mongrel, sexually mature male albino rats ( $n = 60$ ). The experimental groups received NC intragastric administration for 10 days at doses of 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 500}$ ) and 5000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$ ) body weight. The control groups received 0.5 ml of 0.9% NaCl. Rats' behavior was studied using the «open-field» method using the EthoStudio setup. EEG recording and analysis were performed using a «Neuron-Spectr-1/V» device. Rats were examined immediately and 6 months after the end of exposure.

**Results.** In the early post-exposure period, the distance traveled increased in the  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$  group compared to intact animals. In the 1<sup>st</sup> period, the average power of alpha and beta-1 rhythms increased in the  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 500}$  group in lead Fp1-A1 compared to the control group. In rats, immediately after receiving NC in doses of 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$  and 5000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , an increase in the delta rhythm and a decrease in theta and alpha rhythms were noted in lead C3-A1 compared to the control according to the rhythm index. After 6 months, the number of the supported rearing decreased in the  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG 5000}$  group compared to the control group. In the

remote period, a decrease in the average amplitude of delta and theta rhythms in lead *Fp1-A1* in the experimental groups compared to the control group was more informative. The amplitude of the theta rhythm in the  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  500 group was also lower than in the  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  5000 group.

**Limitations.** The study was limited to examining behavioral responses in the «open field» and EEG parameters in male albino rats immediately after 10 days of administration of NC  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  at doses of 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$  and 5000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  and a 6-month post-exposure period.

**Conclusion.** During the post-exposure period, NC  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  at doses of 500 and 5000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  caused changes in behavioral responses and EEG in rats that were not dose-dependent, which requires further study.

**Keywords:** nanocomposite; iron oxide; arabinogalactan; behavior; EEG

**Compliance with Ethical Standards.** The study was approved by the local Ethics Committee of the East Siberian Institute of Medical and Ecological Research (ESIMER) (Conclusion No. 8 dated December 15, 2023) and was conducted in compliance with the international standards of the European Convention (ETS No. 123) and GLP requirements.

**For citation:** Yakimova N.L., Novikov M.A., Skrynnik A.S., Lizarev A.V. Evaluation of the neurotropism of iron (II, III) oxide nanocomposite in the course of the post-exposure period based on changes in electroencephalography parameters and behavioral responses in rats. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(9): 1036–1042. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1036-1042> <https://elibrary.ru/kleumf> (In Russ.)

**For correspondence:** Natalya L. Yakimova, e-mail: ynl-77@list.ru

**Contribution:** Yakimova N.L. – collection and processing of material, registration and description of EEG, writing text, editing; Novikov M.A. – the concept and design of the study, implementation of animal studies, editing; Skrynnik A.S. – collection and processing of material, and description of the results of the study of behavior; Lizarev A.V. – collection of material, EEG registration, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to L.M. Sosodova, DSc (Medicine), professor, for consultative assistance and editing the article.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study was carried out within the framework of a government assignment and had no additional sources of sponsorship.

Received: April 20, 2026 / Revised: July 10, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Основные области применения наночастиц (НЧ) – контрастные вещества для магнитно-резонансной томографии (МРТ) и магнитные носители для доставки лекарств через гематоэнцефалический барьер, например, НЧ железа, при лечении болезни Альцгеймера, глиобластомы [1, 2]. Однако использование магнитных наночастиц (МНЧ) ограничено потенциальной токсичностью, которая зависит от их биосовместимости. Функционализация МНЧ лигандами повышает взаимодействие с организмом за счёт изменения заряда и формы МНЧ, предотвращая опсонизацию, увеличения времени циркуляции МНЧ в крови и приводит к их накоплению только в необходимых органах [3]. Способы введения МНЧ в организм влияют на их токсичность и тканевую совместимость. В частности, интраназальное введение МНЧ вызывает морфологические изменения, активацию и пролиферацию микроглии в обонятельной луковице, гиппокампе и полосатом теле [4], а острое пероральное введение МНЧ приводит к ингибированию ацетилхолинэстеразы,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -АТФазы и  $\text{Mg}^{2+}$ - и  $\text{Ca}^{2+}$ -АТФазы у крыс [5]. Покрытие МНЧ – важный фактор, определяющий их биосовместимость [6]. По данным Gárate-Vélez L. и соавт., НЧ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  могут взаимодействовать с микрососудистыми эндотелиальными клетками, образующими ГЭБ, и проникать через них, вызывая биологические повреждения [7]. Ранее проведён эксперимент [8] по подострому внутрижелудочному введению НК оксида железа, инкапсулированного в полимерную матрицу арабиногалактана (АГ). Содержание железа в препарате составляло 3,6%, размер наночастиц – 5–20 нм. В раннем периоде после воздействия НК оксида железа у крыс развивался периваскулярный отёк сосудов головного мозга, уменьшалось число нормальных нейронов на единицу площади, увеличивалось число нейронов с экспрессией стресс-белка теплового шока (БТШ) 70 [8]. Существуют данные о том, что неорганические НЧ могут быть нейротоксичными при накоплении в мозге [9, 10], однако отдалённые нейротоксические эффекты НЧ оксида железа остаются неизученными. Таким образом, исследования нейротоксических свойств вновь синтезированного НК оксида железа, инкапсулированного в природную матрицу АГ, являются актуальными.

**Цель исследования** – дать оценку нейротоксичности НК оксида железа, инкапсулированного в природную матрицу АГ, в динамике постконтактного периода по изменению показателей электроэнцефалографии (ЭЭГ) и поведенческих реакций у крыс.

## Материалы и методы

Экспериментальные исследования выполняли в соответствии с Женевской конвенцией (1990 г.), директивой Совета Европейского сообщества (86/609/ЕЭС) от 24 ноября 1986 г., Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (Страсбург, № 123 от 18.03.1986 г.), Хельсинкской декларацией о гуманном отношении к животным (Leuven, Belgium, от 19.10.2024 г.). На проведение экспериментов было получено разрешение локального этического комитета ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований» (заключение № 8 от 15.12.2023 г.). Работу выполняли на крысах, полученных из одного источника путём собственного воспроизводства в виварии. В течение всего эксперимента животные находились в стандартных условиях вивария при естественном освещении, влажность воздуха составляла 55–60%, температура воздуха – плюс  $20 \pm 2$  °С. Крысы получали гранулированный комбикорм, обогащённый витаминами и биодобавками, в соответствии с требованиями к содержанию животных в вивариях, круглосуточно имели свободный доступ к поилкам с питьевой водой и корму.

Объектами исследования являлись беспородные половозрелые белые крысы-самцы, по 30 животных в каждый срок обследования (несвязанные выборки). Животные были распределены случайным образом в группы по 10 особей. Крысы опытных групп получали НК оксида железа, инкапсулированный в природную полимерную матрицу АГ, интрагастрально в течение 10 дней, в дозах 500 мкг/кг (группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  500) и 5000 мкг/кг массы тела (группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  5000). Дозы НК были выбраны по результатам ранее проведённых исследований как действующие и способные вызывать выраженные и устойчивые изменения у крыс [11], 10-кратная доза выбрана согласно основам токсикологии. Особям контрольных групп внутрижелудочно вводили 0,5 мл 0,9%-го NaCl при аналогичных условиях. Животные были обследованы дважды: непосредственно после окончания экспозиции НК (1-й срок) и через 6 мес постконтактного периода (2-й срок).

Поведенческие реакции крыс изучали в тесте «открытое поле» сразу после завершения воздействия НК. Тестирование проводили на круглой арене диаметром 40 см, с полупрозрачным полом, стенами высотой 25 см и инвертированным освещением. Использовали системы трёхмерного слежения за животными EthoStudio (Россия). Крыс помещали возле стены и в течение 3 мин автоматически с помощью ПО оценивали общее пройденное расстояние (м), время (%)

Таблица 1 / Table 1

Показатели поведенческих реакций белых крыс в «открытом поле» в динамике постконтактного периода, *Me* ( $Q_{25}$ – $Q_{75}$ )Behavioral response indices of albino rats in the «open field» in the course of the post-exposure period, *Me* ( $Q_{25}$ – $Q_{75}$ )

| Группы животных<br>Animal groups                                                 | Время в центре, %<br>Time in the center, % | Исследованная площадь арены, %<br>Area explored in the arena, % | Пройденный путь, см<br>Path, cm | Вертикальная двигательная активность, мм<br>Vertical motor activity, mm | Обнюхивание отверстий, число актов<br>Sniffing, number | Груминг, число актов<br>Grooming, number | Вертикальная стойка, число<br>Rearing, number | Стойка с упором, число<br>Supported rearing, number | Дефекация, число актов<br>Defecation acts, number |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>1-й срок   1<sup>st</sup> period</i>                                          |                                            |                                                                 |                                 |                                                                         |                                                        |                                          |                                               |                                                     |                                                   |
| Контроль<br>Control                                                              | 0.12<br>(0.09–0.16)                        | 48.20<br>(42.60–58.60)                                          | 698.00<br>(584.50–759.80)       | 28.43<br>(22.53–31.46)                                                  | 4.50<br>(3.00–7.00)                                    | 2.00<br>(2.00–2.00)                      | 4.00<br>(1.00–6.00)                           | 9.50<br>(6.00–12.00)                                | 0.00<br>(0.00–1.00)                               |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> АГ 500<br>Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 0.07<br>(0.03–0.16)                        | 48.90<br>(41.10–52.80)                                          | 858.80<br>(747.10–879.20)#      | 33.62<br>(31.02–40.05)                                                  | 5.50<br>(3.00–8.00)                                    | 1.50<br>(1.00–2.00)                      | 3.00<br>(2.00–4.00)                           | 13.50<br>(11.00–15.00)                              | 0.00<br>(0.0–2.00)                                |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> АГ 5000<br>Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000 | 0.11<br>(0.07–0.14)                        | 55.40<br>(53.20–57.80)                                          | 865.80<br>(817.50–969.10)*      | 36.57<br>(29.84–40.62)                                                  | 7.00<br>(6.00–8.00)                                    | 2.00<br>(1.00–2.00)                      | 3.50<br>(1.00–7.00)                           | 13.50<br>(10.00–17.00)                              | 0.50<br>(0.00–2.00)                               |
| <i>2-й срок   2<sup>nd</sup> period</i>                                          |                                            |                                                                 |                                 |                                                                         |                                                        |                                          |                                               |                                                     |                                                   |
| Контроль<br>Control                                                              | 0.01<br>(0.00–0.01)                        | 25.50<br>(19.00–27.90)                                          | 318.80<br>(279.90–404.00)       | 10.12<br>(8.90–15.51)                                                   | 1.00<br>(1.00–2.00)                                    | 1.00<br>(0.00–3.00)                      | 0.00<br>(0.00–0.00)                           | 2.00<br>(1.00–2.00)                                 | 0.00<br>(0.00–2.00)                               |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> АГ 500<br>Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 0.07<br>(0.04–0.12)*                       | 16.50<br>(11.20–20.20)                                          | 281.20<br>(268.40–283.50)       | 8.65<br>(7.96–9.22)                                                     | 1.00<br>(0.00–1.00)                                    | 1.00<br>(0.00–2.00)                      | 0.00<br>(0.00–0.00)                           | 1.00<br>(1.00–2.00)                                 | 2.00<br>(1.00–2.00)                               |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> АГ 5000<br>Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000 | 0.03<br>(0.01–0.05)                        | 10.40<br>(8.70–19.60)#                                          | 206.40<br>(142.40–267.00)#      | 7.44<br>(4.78–10.32)                                                    | 0.00<br>(0.00–1.00)                                    | 2.00<br>(0.00–2.00)                      | 0.00<br>(0.00–0.00)                           | 1.00<br>(0.00–1.00)*                                | 1.00<br>(0.00–2.00)                               |

Примечание. \* – различия статистически значимы при сравнении с группой контроля по критерию Манна – Уитни с поправкой Бонферрони при  $p < 0,017$ ; # – различия при сравнении с группой контроля на уровне тенденции при  $p < 0,10$ . Во всех группах число животных равно 10.

Note: \* – differences are statistically significant when compared with the control group using the Mann – Whitney test with Bonferroni correction at  $p < 0.017$ ; # – differences when compared with the control group at the trend level at  $p < 0.10$ . The number of animals is 10 in all groups.

нахождения животного в центральной части арены (время нахождения в центре выражалось в процентах от общего времени наблюдения) и площадь исследуемой арены (рассчитывалась как доля арены (%), посещаемая крысой), а количество актов фризинга (замирания животного более чем на 3 с) регистрировали вручную. С помощью редактора карт программы EthoStudio визуализировали активность животных во время тестирования в «открытом поле».

На следующие сутки после тестирования крыс в «открытом поле» выполняли регистрацию фоновой ЭЭГ длительностью 60 с прибором «Нейрон-Спектр-1/В» (ООО «Нейрософт», Россия) с подкожными стальными игольчатыми электродами длиной 15 мм. Запись ЭЭГ проводили с двух стандартных отведений Fp1-A1 (префронтального) и C3-A1 (центрального) соматосенсорных областей головного мозга. Референтный электрод фиксировали в области носовой пазухи, заземляющий электрод закрепляли на хвосте животного. Изучали среднюю амплитуду (мкВ), среднюю мощность (мкВ<sup>2</sup>), мощность спектров (индекс ритмов, %). Параметры фильтров высоких и низких частот – 0,5 и 35 Гц, частота квантования – 500 Гц. При анализе записи было включено автоматическое удаление артефактов. Изучали характеристики основных ритмов: дельта ( $\Delta$ ) (0,5–4 Гц), тета ( $\theta$ ) (4–8 Гц), альфа ( $\alpha$ ) (8–13 Гц), бета-1 ( $\beta_1$ ) (13–22 Гц) и бета-2 ( $\beta_2$ ) (22–32 Гц). Длительность эпох анализа была равна 10 с. Обработку, анализ ЭЭГ и формирование протоколов выполняли с применением программного обеспечения «Нейрон-Спектр-1/В» (ООО «Нейрософт», Россия). Первичные данные протоколов ЭЭГ обрабатывали с помощью пакета прикладных программ Statistica 6 for Windows. Статистическую обработку и анализ данных (несвязанные выборки) выполняли при помощи непараметрических методов с ис-

пользованием критерия Манна – Уитни. Проверку нулевой гипотезы распределения данных проводили по критерию Шапиро – Уилка. Результаты представляли в виде медианы (*Me*) и интерквартильного интервала ( $Q_{25}$ – $Q_{75}$ ), различия между группами с учётом поправки Бонферрони считали значимыми при  $p < 0,017$ .

## Результаты

Непосредственно после окончания воздействия НК у крыс в тесте «открытое поле» увеличивалась двигательная активность (табл. 1).

У животных в группе Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>АГ 500 в виде тенденции ( $p = 0,045$ ) увеличивался пройденный путь – компонент горизонтальной двигательной активности, а в группе Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>АГ 5000 он возрастал статистически значимо ( $p = 0,009$ ) по сравнению с контролем.

У особей в группе Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>АГ 500 время нахождения в центре не изменилось ко 2-му сроку обследования, но было больше ( $p = 0,006$ ) по сравнению с крысами контрольной группы, у которых данный показатель значительно снизился в постконтактном периоде. У животных группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>АГ 5000 по сравнению с контрольными крысами наблюдалось уменьшение ( $p = 0,042$ ) исследования площади арены и пройденного пути ( $p = 0,022$ ), имеющее характер тенденции. В то же время во всех группах в отдалённом периоде отсутствовал акт вертикальной стойки. Вертикальная двигательная активность (мм) значимо не различалась у опытных и контрольных животных в оба срока, но у особей группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>АГ 5000 к отдалённому сроку уменьшилось ( $p = 0,029$ ) число стоек с упором по сравнению с данным показателем у интактных особей. У этих крыс происходило угнетение

Таблица 2 / Table 2

**Значения средней амплитуды ЭЭГ (мкВ) у белых крыс в динамике постконтактного периода,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$**   
**Values of the average EEG amplitude ( $\mu V$ ) in albino rats in the course of the post-exposure period,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$**

| Группы животных<br>Animal Groups        | Отведение Fp1-A1   Lead Fp1-A1 |                         |                         |                         |                        |                              |                         |                         |                        |                        |
|-----------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|                                         | Ритмы<br>Rhythms               |                         |                         |                         |                        | Отведение C3-A1   Lead C3-A1 |                         |                         |                        |                        |
|                                         | Дельта   Delta                 | Тета   Theta            | Альфа   Alpha           | Бета-1   Beta-1         | Бета-2   Beta-2        | Дельта   Delta               | Тета   Theta            | Альфа   Alpha           | Бета-1   Beta-1        | Бета-2   Beta-2        |
| <i>1-й срок   1<sup>st</sup> period</i> |                                |                         |                         |                         |                        |                              |                         |                         |                        |                        |
| Контроль<br>Control                     | 62.05<br>(60.20–65.60)         | 40.55<br>(37.10–41.80)  | 23.95<br>(22.50–25.20)  | 10.45<br>(10.00–11.30)  | 11.50<br>(10.10–13.40) | 68.95<br>(64.00–72.40)       | 43.25<br>(39.50–45.20)  | 30.15<br>(28.60–31.60)  | 13.35<br>(10.80–14.20) | 10.85<br>(9.80–13.30)  |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 72.60<br>(64.00–77.30)#        | 41.20<br>(38.70–44.30)  | 27.55<br>(25.40–29.60)* | 12.75<br>(12.00–13.10)# | 12.60<br>(11.40–14.50) | 69.90<br>(68.20–74.90)       | 41.05<br>(39.40–42.50)  | 28.10<br>(27.80–28.30)# | 12.60<br>(11.80–13.10) | 12.00<br>(10.20–14.20) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000  | 60.95<br>(53.25–73.05)         | 40.15<br>(38.95–41.70)  | 27.15<br>(24.85–28.45)# | 12.70<br>(10.15–14.25)  | 13.05<br>(10.40–14.55) | 73.30<br>(66.25–81.15)#      | 41.65<br>(40.00–45.80)  | 26.90<br>(25.85–29.65)# | 13.00<br>(11.45–14.00) | 12.35<br>(10.60–13.35) |
| <i>2-й срок   2<sup>nd</sup> period</i> |                                |                         |                         |                         |                        |                              |                         |                         |                        |                        |
| Контроль<br>Control                     | 50.20<br>(26.70–56.30)         | 34.80<br>(26.80–35.70)  | 20.20<br>(18.20–21.30)  | 9.70<br>(9.00–11.00)    | 16.10<br>(12.70–16.60) | 62.30<br>(59.60–64.30)       | 35.90<br>(34.70–37.10)  | 24.00<br>(21.30–24.40)  | 10.20<br>(9.40–11.40)  | 11.90<br>(10.20–14.30) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 9.30<br>(0.00–24.85)*          | 5.50<br>(2.35–22.20)*   | 18.05<br>(17.25–19.15)  | 8.40<br>(8.05–9.25)     | 13.30<br>(9.70–15.80)  | 47.15<br>(42.55–60.75)#      | 34.15<br>(33.80–34.80)# | 21.80<br>(20.85–24.30)  | 9.10<br>(8.50–9.90)    | 11.40<br>(8.30–12.95)  |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000  | 9.85<br>(0.00–18.65)*          | 29.10<br>(22.25–35.75)* | 19.85<br>(17.95–21.75)  | 9.40<br>(8.70–10.75)    | 14.4<br>(10.45–17.45)  | 56.70<br>(38.50–61.10)*      | 35.90<br>(34.25–37.75)  | 24.15<br>(22.05–25.45)  | 10.10<br>(9.55–10.60)# | 11.90<br>(9.35–14.15)  |

Примечание: \* – различия статистически значимы при сравнении с группой контроля по критерию Манна – Уитни с поправкой Bonferroni при  $p < 0.017$ ; # – различия статистически значимы при сравнении с группой Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 при  $p < 0.017$ ; # – различия при сравнении с группой контроля на уровне тенденции при  $p < 0.10$ . Во всех группах число животных равно 10.  
 Note: \* – differences are statistically significant when compared with the control group using the Mann – Whitney test with Bonferroni correction at  $p < 0.017$ ; # – differences are statistically significant when compared with the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 group at  $p < 0.017$ ; # – differences when compared with the control group at the trend level at  $p < 0.10$ . The number of animals is 10 in all groups.

Таблица 3 / Table 3

**Значения средней мощности спектров ЭЭГ (мкВ<sup>2</sup>) у белых крыс в динамике постконтактного периода,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$**   
**Values of the average power of the EEG spectra ( $\mu V^2$ ) in albino rats in the course of the post-exposure period,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$**

| Группы животных<br>Animal Groups        | Отведение Fp1-A1   Lead Fp1-A1 |                      |                      |                      |                      |                              |                      |                      |                      |                     |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|                                         | Ритмы<br>Rhythms               |                      |                      |                      |                      | Отведение C3-A1   Lead C3-A1 |                      |                      |                      |                     |
|                                         | Дельта   Delta                 | Тета   Theta         | Альфа   Alpha        | Бета-1   Beta-1      | Бета-2   Beta-2      | Дельта   Delta               | Тета   Theta         | Альфа   Alpha        | Бета-1   Beta-1      | Бета-2   Beta-2     |
| <i>1-й срок   1<sup>st</sup> period</i> |                                |                      |                      |                      |                      |                              |                      |                      |                      |                     |
| Контроль<br>Control                     | 16.26<br>(14.50–19.26)         | 5.68<br>(4.03–6.25)  | 1.59<br>(1.38–2.08)  | 0.35<br>(0.33–0.44)  | 0.16<br>(0.12–0.23)  | 24.29<br>(20.09–31.56)       | 6.72<br>(5.98–8.47)  | 3.30<br>(2.93–4.11)  | 0.69<br>(0.40–0.82)  | 0.15<br>(0.12–0.24) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 33.68<br>(22.42–39.11)#        | 6.54<br>(5.20–8.41)  | 2.68<br>(2.13–3.30)* | 0.59<br>(0.56–0.69)* | 0.23<br>(0.12–0.30)  | 33.73<br>(30.31–42.81)#      | 6.04<br>(4.93–6.90)  | 2.87<br>(2.47–2.95)# | 0.62<br>(0.55–0.67)  | 0.21<br>(0.12–0.29) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000  | 15.82<br>(10.34–37.24)         | 4.96<br>(4.29–6.35)^ | 2.08<br>(1.65–2.90)  | 0.59<br>(0.31–0.74)  | 0.23<br>(0.12–0.25)  | 45.00<br>(26.07–59.10)#      | 6.34<br>(5.80–8.73)  | 2.35<br>(1.87–3.15)# | 0.67<br>(0.46–0.78)  | 0.23<br>(0.17–0.29) |
| <i>2-й срок   2<sup>nd</sup> period</i> |                                |                      |                      |                      |                      |                              |                      |                      |                      |                     |
| Контроль<br>Control                     | 8.34<br>(6.91–10.22)           | 2.48<br>(1.99–3.31)  | 0.84<br>(0.52–0.93)  | 0.26<br>(0.19–0.32)  | 0.18<br>(0.14–0.22)  | 19.73<br>(16.73–23.21)       | 3.45<br>(2.69–4.29)  | 1.53<br>(1.02–1.60)  | 0.30<br>(0.24–0.39)  | 0.13<br>(0.12–0.18) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500   | 5.99<br>(3.93–6.54)#           | 1.42<br>(1.14–1.60)* | 0.41<br>(0.30–0.48)# | 0.14<br>(0.12–0.19)  | 0.14<br>(0.06–0.16)# | 11.43<br>(10.31–19.90)#      | 2.09<br>(1.98–2.39)* | 0.99<br>(0.76–1.31)# | 0.21<br>(0.18–0.29)  | 0.12<br>(0.05–0.15) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000  | 4.68<br>(4.25–5.55)*           | 2.05<br>(1.78–2.45)* | 0.67<br>(0.43–0.71)^ | 0.19<br>(0.17–0.25)^ | 0.16<br>(0.11–0.20)  | 13.92<br>(8.87–16.76)*       | 2.69<br>(2.54–3.36)* | 1.23<br>(1.03–1.73)  | 0.28<br>(0.23–0.32)# | 0.15<br>(0.09–0.19) |

Примечание: \* – различия статистически значимы при сравнении с группой контроля по критерию Манна – Уитни с поправкой Bonferroni при  $p < 0.017$ ; # – различия статистически значимы при сравнении с группой Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 при  $p < 0.017$ ; ^ – различия при сравнении с группой Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 на уровне тенденции при  $p < 0.10$ . Во всех группах количество животных равно 10.

Note: \* – differences are statistically significant when compared with the control group using the Mann – Whitney test with Bonferroni correction at  $p < 0.017$ ; # – differences are statistically significant when compared with the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 group at  $p < 0.017$ ; ^ – differences when compared with the control group at the trend level at  $p < 0.10$ . The number of animals is 10 in all groups.

Таблица 4 / Table 4

Значения индексов ритмов ЭЭГ (%) у белых крыс в динамике постконтактного периода,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$ Values of EEG rhythm indices (%) in albino rats in the course of the post-exposure period,  $Me (Q_{25}-Q_{75})$ 

| Группы животных<br>Animal Groups       | Отведение Fp1-A1   Lead Fp1-A1    |                         |                        |                     |                      |                                   |                         |                        |                      |                     |
|----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
|                                        | Отведение C3-A1   Lead C3-A1      |                         |                        |                     |                      |                                   |                         |                        |                      |                     |
|                                        | Ритмы Rhythms                     |                         |                        |                     |                      |                                   |                         |                        |                      |                     |
|                                        | Дельта   Delta                    | Тета   Theta            | Альфа   Alpha          | Бета-1   Beta-1     | Бета-2   Beta-2      | 1-й срок   1 <sup>st</sup> period |                         |                        |                      |                     |
| Контроль<br>Control                    | 62.55<br>(55.00–66.70)            | 21.70<br>(19.30–26.00)  | 9.50<br>(8.40–12.90)   | 2.45<br>(1.70–3.10) | 2.65<br>(2.00–3.40)  | 62.40<br>(58.20–64.70)            | 20.20<br>(16.90–21.60)  | 13.10<br>(12.00–16.30) | 2.50<br>(2.20–2.90)  | 1.60<br>(1.20–2.20) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500  | 68.25<br>(58.20–75.60)#           | 16.60<br>(12.50–19.40)# | 10.50<br>(7.50–11.30)  | 2.30<br>(1.90–2.60) | 2.00<br>(1.40–3.10)  | 72.60<br>(70.20–73.90)*           | 12.70<br>(12.40–17.00)* | 9.85<br>(8.80–11.50)*  | 2.20<br>(2.00–2.50)# | 1.70<br>(1.30–2.50) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000 | 56.85<br>(50.20–72.60)            | 19.40<br>(15.05–23.80)  | 15.40<br>(8.25–17.00)  | 2.55<br>(1.95–4.65) | 2.45<br>(1.75–3.70)  | 73.90<br>(69.40–75.50)*           | 14.25<br>(13.15–16.80)* | 8.00<br>(7.10–8.95)*^  | 2.05<br>(1.60–2.50)  | 1.70<br>(1.25–2.55) |
|                                        | 2-й срок   2 <sup>nd</sup> period |                         |                        |                     |                      |                                   |                         |                        |                      |                     |
| Контроль<br>Control                    | 56.60<br>(54.40–60.60)            | 21.20<br>(19.60–25.00)  | 8.90<br>(6.20–13.00)   | 3.00<br>(2.30–4.20) | 6.10<br>(3.70–7.90)  | 73.70<br>(72.70–75.10)            | 13.50<br>(12.80–14.10)  | 8.50<br>(6.50–9.40)    | 1.70<br>(1.60–2.30)  | 2.30<br>(1.90–2.70) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 500  | 64.80<br>(52.70–68.55)            | 17.30<br>(15.45–22.85)  | 7.95<br>(6.40–11.50)   | 2.90<br>(2.65–4.05) | 6.45<br>(3.40–10.80) | 73.25<br>(63.95–77.20)            | 13.35<br>(10.40–15.30)  | 9.75<br>(6.80–12.00)   | 2.05<br>(1.40–2.70)  | 1.85<br>(1.40–4.35) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> AG 5000 | 52.60<br>(52.10–55.90)#^          | 23.90<br>(23.60–26.70)^ | 11.80<br>(9.30–13.80)^ | 3.60<br>(3.20–4.40) | 7.70<br>(5.60–9.70)  | 65.80<br>(62.20–69.10)#           | 17.50<br>(13.60–18.40)  | 13.20<br>(7.90–13.70)^ | 2.40<br>(2.20–2.90)# | 2.90<br>(2.00–3.70) |

Примечание: \* – различия статистически значимы при сравнении с группой контроля по критерию Манна – Уитни с поправкой Bonferroni при  $p < 0.017$ ; ^ – различия при сравнении с группой Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 на уровне тенденции при  $p < 0.10$ ; # – различия при сравнении с группой контроля на уровне тенденции при  $p < 0.10$ . Во всех группах число животных равно 10. Note: \* – differences are statistically significant when compared with the control group using the Mann – Whitney test with Bonferroni correction at  $p < 0.017$ ; ^ – differences when compared with the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 group at the trend level at  $p < 0.10$ ; # – differences when compared with the control group at the trend level at  $p < 0.10$ . In all groups the number of animals is 10.

ориентировочно-исследовательской и горизонтальной двигательной активности. Эти признаки указывают на депрессивноподобное состояние животных опытных групп (см. табл. 1).

С помощью редактора карт программы EthoStudio установлены различия визуализации пространственного распределения животных в динамике эксперимента. Особи из опытных групп, подвергавшихся воздействию НК в дозах 500 и 5000 мкг/кг, демонстрировали более выраженную двигательную активность по сравнению с контрольными крысами, особенно в центральной и промежуточной части арены (рис. 1, см. на вклейке).

У крыс из опытных групп в отдалённом периоде обследования снижение общей двигательной активности подтверждала репрезентативная визуализация (рис. 2, см. на вклейке).

Нарушения поведения у крыс после воздействия НК связаны с нейрофизиологическими изменениями, регистрируемыми на ЭЭГ. У крыс-самцов в раннем периоде после окончания введения НК Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG в дозе 500 мкг/кг массы тела при анализе биоэлектрической активности головного мозга с префронтального отведения Fp1-A1 наблюдалось повышение средней амплитуды на уровне тенденции у дельта-ритмов ( $p = 0,041$ ) и бета-1-ритмов ( $p = 0,041$ ), а у альфа-ритма статистически значимое её возрастание ( $p = 0,009$ ) по сравнению со средней амплитудой этих ритмов у контрольных животных (табл. 2). В отдалённом периоде в обеих опытных группах в префронтальном отведении Fp1-A1 снижалась средняя амплитуда дельта-ритма при  $p = 0,016$  и при  $p = 0,009$ , тета-ритма при  $p = 0,004$  и при  $p = 0,185$  по сравнению с контрольной группой соответственно. Средняя амплитуда тета-ритма у крыс группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 была статистически значимо ниже ( $p = 0,012$ ) данного показателя у особей группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 5000.

У особей группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 средняя мощность медленноволнового диапазона дельта-ритма ЭЭГ в обоих отведениях возросла на уровне тенденции ( $p = 0,019$ ) по сравнению с показателем контрольных крыс (табл. 3).

У этих же крыс в префронтальном отведении повысилась средняя мощность быстроговолновых альфа- и бета-1-ритмов ( $p = 0,005$  и  $p = 0,016$  соответственно) по отношению к значениям контрольной группы. В то же время у крыс, получавших НК в дозе 5000 мкг/кг массы тела, не фиксировали статистически значимых изменений биоэлектрической активности головного мозга. У них наблюдали разнонаправленные результаты в виде тенденций (см. табл. 3).

У крыс опытной группы после воздействия НК в дозе 500 мкг/кг в префронтальном отведении Fp1-A1 установлено снижение значений мощности по индексу тета-ритма в виде тенденции ( $p = 0,023$ ) по сравнению с показателями контрольной группы (табл. 4).

В раннем периоде наибольшие различия на ЭЭГ крыс при воздействии НК оксида железа в обеих дозах установлены в центральном отведении (C3-A1), выявлялись однонаправленные изменения: повышение мощности по индексу дельта-ритма ( $p = 0,004$  и  $p = 0,003$  соответственно), снижение мощности по индексу тета-ритма ( $p = 0,011$  и  $p = 0,010$  соответственно) и по индексу альфа-ритма ( $p = 0,007$  и  $p = 0,001$  соответственно) по сравнению с контрольной группой. Кроме того, у особей группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 5000 в отведении C3-A1 наблюдалась тенденция к снижению мощности по индексу альфа-ритма по сравнению с крысами группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 ( $p = 0,023$ ). У животных группы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>AG 500 в центральном отведении снижение мощности спектров по индексу бета-1-ритма имело характер тенденции по сравнению с интактными особями ( $p = 0,089$ ) (см. табл. 4).

## Обсуждение

В динамике постконтактного периода и в опытных, и в контрольных группах отмечали изменения горизонтальной и вертикальной двигательной активности. В раннем постконтактном периоде при тестировании в «открытом поле» выявлено увеличение локомоторной активности, бо-

лее выраженное у животных группы  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  5000, в виде возрастания пройденного пути, что указывало на преобладание процессов возбуждения [12]. В раннем периоде особи, получавшие НК в обеих дозах, дольше находились в центре арены по сравнению с контролем, это подобно поведению грызунов при воздействии препаратов с анксиолитическим эффектом. В отдалённом постконтактном периоде животные опытных групп исследовали лишь малую часть периферии арены «открытого поля» в отличие от поведения в ранний срок обследования и от контрольных особей в оба срока обследования. У крыс отдалённый период после введения НК характеризовался угнетением ориентировочно-исследовательской активности в виде более редких стоек с упором в группе  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  5000 и уменьшением горизонтального компонента поведения, что демонстрировало депрессивноподобное состояние. Подобные результаты наблюдались в другом исследовании с использованием взрослых крыс линии Wistar, у которых подострое воздействие 20 мг/кг НК  $\text{TiO}_2$  приводило к повышению тревожности [13]. Минигалиевой И.А. и соавт. также были показаны угнетающие эффекты на поведение крыс при воздействии НК металлов [14].

Известно, что на изменения в поведении оказывают влияние фоновые биологические ритмы, стресс, новизна обстановки в тесте «открытого поля», сезонность, возраст животных. С возрастом у крыс снижается спонтанная двигательная и исследовательская активность, уменьшается общее пройденное расстояние, увеличиваются периоды неподвижности, усиливается прижимание к стене (поведение, подобное тревоге) из-за общих процессов старения [15]. Базовые параметры ЭЭГ могут существенно различаться у неродственных выборок из-за незначительных различий в условиях выращивания, содержания или старения циркадной системы. В нашем эксперименте обследование крыс в динамике длительного периода после воздействия НК оказывало влияние на результаты вариабельности параметров поведения и ЭЭГ.

Непосредственно после окончания введения НК оксида железа по результатам репрезентативной визуализации в EthoStudio животные опытных групп по сравнению с интактными особями демонстрировали значительное возрастание двигательной активности и резкое её уменьшение к отдалённому постконтактному периоду. НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  при подостром пероральном введении крысам-самцам в дозе 500 мг/кг оказывал влияние на биоэлектрическую активность головного мозга, изменения которой выражались в раннем периоде как возрастание средней амплитуды и мощности дельта-, альфа- и бета-1-диапазонов, а также снижение амплитуды и мощности индекса спектра тета-ритма. Отсутствие дозозависимых изменений средней амплитуды альфа-ритма и средней мощности альфа- и бета-1-ритмов можно объяснить тем, что небольшая доза может выводить систему в оптимальный функциональный пик при наличии изменений. При этом большая доза может приводить к гиперстимуляции или к торможению и истощению систем регуляции, из-за чего параметры возвращаются к исходным значениям или маскируются в виде отсутствия эффекта. Результаты, когда меньшая доза вызывает изменения на ЭЭГ, а большая доза не даёт дозозависимого эффекта, часто встречаются в нейрофармакологии и физиологии. Это требует дальнейших исследований.

В отдалённом периоде выявлено уменьшение амплитуды и мощности спектра дельта-ритма, более значимое у животных, получивших НК в дозе 5000 мг/кг. У этих же животных медленноволновая активность тета-ритма, оставаясь сниженной по сравнению с контрольной группой, была значимо выше, чем в группе  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  500. В этой же группе произошло перераспределение ритмов с доминированием быстроволнового бета-1-ритма.

Таким образом, анализ ЭЭГ свидетельствует о дестабилизации биоэлектрической активности головного мозга крыс после введения НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$ , которая сохранялась длительный период после воздействия. Полученные нами результаты согласуются с данными других исследователей, обнаружив-

ших негативные эффекты воздействия НК на кору головного мозга на тканевом и клеточном уровнях. По мнению авторов [16], чем выше амплитуда медленноволнового тета-ритма, тем более выражен патологический процесс, который, согласно существующим представлениям, связан со структурными и функциональными изменениями головного мозга. Нарастание медленноволновой активности тета-ритма в отдалённом периоде, называемое стресс-ритмом, свидетельствует об эмоциональной нестабильности. Другими исследователями на фоне интраназального введения НК  $\text{TiO}_2$  были зафиксированы выраженные изменения биоэлектрической активности нейронов префронтальной области коры головного мозга крыс в виде преобладания медленноволновой активности тета- и дельта-диапазонов, сопряжённого с уменьшением относительной мощности ритмов альфа-, бета-1, бета-2. Авторы предполагают возможное развитие нейродегенеративных изменений в изучаемой области коры головного мозга [17]. По данным [18], отмечено токсическое действие водной суспензии НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  после внутрибрюшинного введения в дозе 500 мг/кг 3 раза в неделю в течение 5 дней. Авторы обнаружили, что при равных массовых дозах НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  обладают значительно более высокой системной токсичностью по сравнению с микрочастицами. Однако в нанометровом диапазоне связь между размером частиц и резорбтивной токсичностью сложна и неоднозначна, что можно объяснить различиями в токсикокинетике различных НК, которая определяется как более или менее существенным прямым проникновением НК через биологические барьеры, так и их неодинаковой растворимостью. Нарушения функциональной активности головного мозга у крыс в группах  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  500 и  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  5000 могут быть связаны с митохондриальной дисфункцией, вызываемой НК оксида железа, в клетках головного мозга. Морфотипический состав митохондрий показал существенные изменения после интраназальной экспозиции НК оксида железа (III): доля митохондрий с нормальным и везикулярно набухшим морфотипами снизилась по сравнению с контрольной группой животных, доля митохондрий нормально-везикулярного и везикулярного морфотипов повысилась, и доля везикулярно набухших митохондрий снизилась [19]. Изменения ЭЭГ у крыс после воздействия НК оксида железа, вероятно, опосредованы их влиянием на функцию эндотелия сосудов головного мозга. Tyumentseva A. и соавт. доказали, что НК в концентрациях 100 и 200 мг/л вызывают изменение метаболизма в клетках-компонентах ГЭБ – эндотелиоцитах и подлежащих астроцитах [20]. Другие исследователи показали развитие апоптоза при введении МНЧ оксидов железа крысам [21], нарушение краткосрочной и долгосрочной памяти пассивного избегания, снижение уровня дофамина и повышение серотонина в гиппокампе в зависимости от дозы [22], выявили признаки дегенерации нейронов в коре головного мозга [23].

## Заключение

При пероральном введении крысам-самцам НК оксида железа, инкапсулированного в матрицу АГ, в дозах 500 и 5000 мг/кг установлены изменения поведенческой активности и ЭЭГ, не позволяющие сделать однозначные выводы о дозозависимой нейротоксичности. В тесте «открытого поля» у особей увеличение локомоторной активности сразу после окончания экспозиции НК сменялось её снижением в отдалённом периоде, а также уменьшением вертикальной исследовательской активности по сравнению с контрольными животными. В ранний срок после воздействия  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{AG}$  в обеих дозах выявлены однонаправленные эффекты: возрастание средней мощности по индексу дельта-активности и её снижение по индексам тета- и альфа-ритмов по сравнению с контрольными показателями, которые были обратимыми в динамике отдалённого периода. Требуется дальнейшее изучение нейротоксических эффектов НК металлов, в том числе для обоснования дозозависимых изменений в центральной нервной системе.

## Литература

(п.п. 1–7, 9–11, 13, 15, 16, 18, 20–23 см. References)

8. Титов Е.А., Соседова Л.М., Новиков М.А. Анализ токсичности нанокомпозита оксида железа, инкапсулированного в полимерную матрицу арабиногалактана. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(3): 285–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-285-289> <https://elibrary.ru/wiwjmo>
12. Тарасенко А.А., Герунов Т.В. Оценка поведенческой активности крыс при острой интоксикации инсектоакарицидами в тесте «Открытое поле». *Вестник ОмГАУ*. 2019; (1): 126–33. <https://elibrary.ru/ptnglr>
14. Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Рябова Ю.В., Шабардина Л.В., Батенева В.А., Бутакова И.В. и др. Сравнительный анализ собственных экспериментальных данных по изменению поведенческих реакций крыс после субхронического воздействия различных наночастиц. *Здоровье населения и среда обитания – ЗНУСО*. 2023; 31(9): 58–63. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-9-58-63> <https://elibrary.ru/pksjul>
17. Шарафутдинова Л.А., Хисматуллина З.Р., Даминов М.Р., Валиуллин В.В. Исследование эмбриотоксического действия наночастиц диоксида титана на крыс. *Морфологические ведомости*. 2017; 25(3): 37–42. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.17\(25\).03.37-42](https://doi.org/10.20340/mv-mn.17(25).03.37-42) <https://elibrary.ru/zmntyv>
19. Шеломенцев И.Г., Амромин Л.А., Шаихова Д.Р., Сутункова М.П., Минигалиева И.А. Оценка нейротоксического эффекта наночастиц оксида железа (III) на субклеточном уровне. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(7): 720–5. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-720-725> <https://elibrary.ru/neommy>
1. Mao Z., Li X., Wang P., Yan H. Iron oxide nanoparticles for biomedical applications: an updated patent review (2015–2021). *Expert Opin. Ther. Pat.* 2022; 32(9): 939–52. <https://doi.org/10.1080/13543776.2022.2109413> <https://elibrary.ru/wiblyr>
2. Qiao R., Fu C., Forgham H., Javed I., Huang X., Zhu J., et al. Magnetic iron oxide nanoparticles for brain imaging and drug delivery. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2023; 197: 114822. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2023.114822> <https://elibrary.ru/gxnyjy>
3. Zamay G.S., Zamay T.N., Lukyanenko K.A., Kichkailo A.S. Aptamers increase biocompatibility and reduce the toxicity of magnetic nanoparticles used in biomedicine. *Biomedicines*. 2020; 8(3): 59. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8030059> <https://elibrary.ru/xoexuly>
4. Wang Y., Wang B., Zhu M.T., Li M., Wang H.J., Wang M., et al. Microglial activation, recruitment and phagocytosis as linked phenomena in ferric oxide nanoparticle exposure. *Toxicol. Lett.* 2011; 205(1): 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2011.05.001>
5. Kumari M., Rajak S., Singh S.P., Murty U.S., Mahboob M., Grover P., et al. Biochemical alterations induced by acute oral doses of iron oxide nanoparticles in Wistar rats. *Drug Chem. Toxicol.* 2013; 36: 296–305. <https://doi.org/10.3109/01480545.2012.720988> <https://elibrary.ru/ywuwuj>
6. Kumar Prabhakar P., Vijayaraghavan S., John P., Doble M. Biocompatibility studies of functionalized CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles. *Curr. Nanosci.* 2011; 7: 371–6. <https://doi.org/10.2174/157341311795542435>
7. Gárate-Vélez L., Escudero-Lourdes C., Salado-Leza D., González-Sánchez A., Alvarado-Morales I., Bahena D., et al. Anthropogenic iron oxide nanoparticles induce damage to brain microvascular endothelial cells forming the blood-brain barrier. *J. Alzheimers Dis.* 2020; 76(4): 1527–39. <https://doi.org/10.3233/JAD-190929> <https://elibrary.ru/xoqxwe>
8. Titov E.A., Sosedova L.M., Novikov M.A. Analysis of toxicity of iron oxide nanocomposite encapsulated in a polymer matrix of arabinogalactan. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(3): 285–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-285-289> <https://elibrary.ru/wiwjmo> (in Russian)
9. Kostka K., Sokolova V., El-Taibany A., Kruse B., Porada D., Wolff N., et al. The application of ultrasmall gold nanoparticles (2 nm) functionalized with doxorubicin in three-dimensional normal and glioblastoma organoid models of the blood-brain barrier. *Molecules*. 2024; 29(11): 2469. <https://doi.org/10.3390/molecules29112469> <https://elibrary.ru/hlhuya>
10. Behera A., Sa N., Pradhan S.P., Swain S., Sahu P.K. Metal nanoparticles in Alzheimer's disease. *J. Alzheimers Dis. Rep.* 2023; 7(1): 791–810. <https://doi.org/10.3233/ADR-220112> <https://elibrary.ru/hlwfkm>
11. Rukavishnikov V.S., Novikov M.A., Titov E.A., Sosedova L.M., Vokina V.A., Yakimova N.L. Estimation of toxic properties of nanocomposites containing nanoparticles of bismuth, gadolinium, and silver. *Trace Elem. Electrolytes*. 2018; 35: 203–6. <https://doi.org/10.5414/TEX0155408> <https://elibrary.ru/yokibn>
12. Tarasenko A.A., Gerunov T.V. Evaluation of behavioral activity of rats during acute intoxication with insectoacaricides in the «open field» test. *Vestnik OmGAU*. 2019; (1): 126–33. <https://elibrary.ru/ptnglr> (in Russian)
13. Younes N.R., Amara S., Mrad I., Ben-Slama I., Jeljeli M., Omri K., et al. Subacute toxicity of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles in male rats: emotional behavior and pathophysiological examination. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2015; 22(11): 8728–37. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4002-5> <https://elibrary.ru/uixssf>
14. Minigaliev I.A., Sutunkova M.P., Ryabova Yu.V., Shabardina L.V., Bateneva V.A., Butakova I.V., et al. Comparative analysis of own experimental data on changes in rat behavioral responses following subchronic exposure to various nanoparticles. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO*. 2023; 31(9): 58–63. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-9-58-63> <https://elibrary.ru/pksjul> (in Russian)
15. Boguszewski P., Zagrodzka J. Emotional changes related to age in rats – a behavioral analysis. *Behav. Brain Res.* 2002; 133(2): 323–32. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(02)00018-9)
16. Moretti D.V. Theta and alpha EEG frequency interplay in subjects with mild cognitive impairment: evidence from EEG, MRI, and SPECT brain modifications. *Front. Aging Neurosci.* 2015; 7: 31. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00031> <https://elibrary.ru/uotakb>
17. Sharafutdinova L.A., Khismatullina Z.R., Daminov M.R., Valiullin V.V. The study of embryotoxic effect of titanium dioxide nanoparticles on rats. *Morfologicheskie vedomosti*. 2017; 25(3): 37–42. [https://doi.org/10.20340/mv-mn.17\(25\).03.37-42](https://doi.org/10.20340/mv-mn.17(25).03.37-42) <https://elibrary.ru/zmntyv> (in Russian)
18. Katsnelson B.A., Degtyareva T.D., Minigaliev I.I., Privalova L.I., Kuzmin S.V., Yermenko O.S., et al. Subchronic systemic toxicity and bioaccumulation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nano- and microparticles following repeated intraperitoneal administration to rats. *Int. J. Toxicol.* 2011; 30(1): 59–68. <https://doi.org/10.1177/1091581810385149> <https://elibrary.ru/ohtawh>
19. Shelomentsev I.G., Amromin L.A., Shaikhova D.R., Sutunkova M.P., Minigaliev I.A. Assessment of the neurotoxic effect of iron (III) oxide nanoparticles at the subcellular level. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(7): 720–5. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-720-725> <https://elibrary.ru/neommy> (in Russian)
20. Tyumentseva A., Khilazheva E., Petrova V., Stolyar S. Effects of iron oxide nanoparticles on the gene expression profiles of cerebral endothelial cells and astrocytes. *Toxicol. In Vitro*. 2024; 98: 105829. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2024.105829> <https://elibrary.ru/otgkru>
21. Kim Y., Kong S.D., Chen L.-H., Pisanic T.R., Jin S., Shubayev V.I. In vivo nanoneurotoxicity screening using oxidative stress and neuroinflammation paradigms. *Nanomedicine*. 2013; 9: 1057–66. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2013.05.002>
22. Khorshidi M., Kesmati M., Pour L., Varzi H.N. Comparison of the effect of iron oxide nanoparticles and bulk on the memory and associated alterations in dopamine and serotonin levels in the hippocampus of adult male rats. *Physiol. Pharmacol.* 2013; 17: 204–15.
23. Fahmy H.M., Aly E.M., Mohamed F.F., Noor N.A., Elsayed A.A. Neurotoxicity of green-synthesized magnetic iron oxide nanoparticles in different brain areas of Wistar rats. *Neurotoxicology*. 2020; 77: 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2019.12.014> <https://elibrary.ru/kpllbd>

## Сведения об авторах

**Якимова Наталья Леонидовна**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: ynl-77@list.ru

**Новиков Михаил Александрович**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: novik\_imt@mail.ru

**Скряник Анна Станиславовна**, мл. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: annaskrynnik@mail.ru

**Лизарев Александр Викторович**, канд. мед. наук, специалист в области науки и техники ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: tox\_lab@mail.ru

## About the authors

**Natalya L. Yakimova**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9686-3841> E-mail: ynl-77@list.ru

**Mikhail A. Novikov**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6100-6292> E-mail: novik\_imt@mail.ru

**Anna S. Skrynnik**, junior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5349-9867> E-mail: annaskrynnik@mail.ru

**Aleksander V. Lizarev**, PhD (Medicine), a specialist in science and technology, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8238-7189> E-mail: tox\_lab@mail.ru



Вокина В.А., Соседова Л.М., Панкова А.А., Абрамова В.А., Титов Е.А., Новиков М.А.

## Отдалённые последствия острой интоксикации торфяным дымом в период полового созревания в эксперименте на животных

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Воздействие торфяного дыма — значимый фактор экологического риска для здоровья населения. Период полового созревания характеризуется повышенной уязвимостью центральной нервной (ЦНС) и репродуктивной систем к действию токсических компонентов дыма, таких как взвешенные частицы ( $PM_{2.5}$ ) и угарный газ (СО).

**Цель работы** — оценка отдалённых последствий воздействия торфяного дыма на ЦНС и репродуктивную систему белых крыс в период полового созревания при моделировании условий, близких к натурным по содержанию  $PM_{2.5}$  и СО.

**Материалы и методы.** Экспозицию торфяным дымом белых крыс обоего пола в период полового созревания осуществляли однократно в течение четырёх часов. Средние концентрации СО и  $PM_{2.5}$  в экспозиционных камерах составили  $29,3 \pm 11,1$  и  $0,39 \pm 0,61$  мг/м<sup>3</sup> соответственно. Обследование в половозрелом возрасте включало анализ поведенческих реакций в тесте «открытое поле», электроэнцефалографию (ЭЭГ), анализ фрагментации ДНК в клетках крови и гистологический анализ ткани мозга и семенников.

**Результаты.** Выявлено снижение двигательной и ориентировочно-исследовательской активности у экспонированных животных обоего пола. Изменения ЭЭГ наблюдались только у самок белых крыс и характеризовались статистически значимым снижением средней амплитуды  $\beta_2$ -ритма и повышением индекса  $\delta$ -ритма по сравнению с показателями контрольной группы. Повреждённость ДНК клеток крови экспонированных животных не имела статистически значимых отличий при сравнении с контролем. При гистологическом исследовании ткани сенсомоторной коры головного мозга и семенников изменений не выявлено.

**Ограничения исследования.** Данное исследование ограничено изучением отдалённых последствий однократного воздействия торфяного дыма для ЦНС и репродуктивной системы белых крыс в период полового созревания.

**Заключение.** Воздействие торфяного дыма потенциально способствует развитию депрессивного поведения у взрослых белых крыс в период полового созревания при сохранении нормальной гистологической картины ткани головного мозга. Гонадотоксический и генотоксический эффекты не выявлены.

**Ключевые слова:** торфяной дым; крысы; поведение; электроэнцефалография; репродуктивная токсичность

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (протокол № 7 от 15.12.2023 г.), проведено в соответствии с Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123), директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей.

**Для цитирования:** Вокина В.А., Соседова Л.М., Панкова А.А., Абрамова В.А., Титов Е.А., Новиков М.А. Отдалённые последствия острой интоксикации торфяным дымом в период полового созревания в эксперименте на животных. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1043–1048. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1043-1048> <https://elibrary.ru/lcaasv>

**Для корреспонденции:** Вокина Вера Александровна, e-mail: vokina.vera@gmail.com

**Вклад авторов:** Вокина В.А. — концепция и дизайн исследования, проведение эксперимента, обработка, анализ и интерпретация данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста, структурирование статьи; Соседова Л.М. — методология исследования, написание текста, структурирование статьи, проверка критически важного содержания; Панкова А.А. — проведение эксперимента, сбор и первичная обработка материала; Абрамова В.А. — сбор и первичная обработка материала, статистическая обработка данных, подготовка иллюстраций; Титов Е.А. — сбор и первичная обработка материала, статистическая обработка данных, подготовка иллюстраций; Новиков М.А. — сбор и первичная обработка материала, статистическая обработка данных, подготовка иллюстраций. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Работа выполнялась по плану НИР в рамках государственного задания.

Поступила: 13.04.2026 / Поступила после доработки: 02.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Vera A. Vokina, Larisa M. Sosedova, Anna A. Pankova, Vera A. Abramova, Eugeniy A. Titov, Mikchail A. Novikov

## Remote term consequences of acute peat smoke intoxication during puberty in an animal experiment

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Exposure to peat smoke is a significant environmental risk factor for public health. The period of puberty is characterized by increased vulnerability of the central nervous and reproductive systems to the toxic components of smoke, such as particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) and carbon monoxide (CO).

**The aim of this study** was to evaluate the remote effects of exposure to peat smoke on the central nervous system and reproductive system in white rats under conditions simulating real-world concentrations of  $PM_{2.5}$  and CO.

**Materials and Methods.** Exposure to peat smoke was performed once for 4 hours during the pubertal period in white rats of both sexes. The mean concentrations of CO and  $PM_{2.5}$  in the exposure chambers were  $29.3 \pm 11.1$  mg/m<sup>3</sup> and  $0.39 \pm 0.61$  mg/m<sup>3</sup>, respectively. Examination at adulthood included analysis of behavioral responses in the open field test, electroencephalography (EEG) recording, analysis of DNA fragmentation in blood cells, and histological analysis of brain tissue and testes.

**Results.** A decrease in locomotor and exploratory activity was observed in exposed animals of both sexes. EEG changes were observed only in female white rats and were characterized by a statistically significant decrease in the mean amplitude of the  $\beta_2$  rhythm and an increase in the  $\delta$  rhythm index compared with the control group. DNA damage in blood cells of exposed animals showed no statistically significant differences when compared with the control. Histological examination of the sensorimotor cortex of the brain and the testes revealed no abnormalities.

**Limitations.** This study is limited to investigating the remote effect of a single exposure to peat smoke during puberty on the central nervous system and reproductive system of white rats.

**Conclusion.** Exposure to peat smoke during puberty potentially contributes to the development of depressive-like behavior in adult white rats while preserving normal histological architecture of brain tissue. No gonadotoxic or genotoxic effects were observed.

**Keywords:** peat smoke; rats; behavior; electroencephalography (EEG); reproductive toxicity

**Compliance with ethical standards.** The study was approved by the Local Ethics Committee (LEC) of the East Siberian Institute of Medical and Environmental Research (Protocol of the LEC of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research No. 7 of 12/15/2023), conducted in accordance with the European Convention for the Protection of Vertebrates Used for Experiments or Other Scientific Purposes (ETS N 123), directive of the European Parliament and the Council Of the European Union 2010/63/EC of 09/22/2010 on the protection of animals used for scientific purposes.

**For citation:** Vokina V.A., Sosodova L.M., Pankova A.A., Abramova V.A., Titov E.A., Novikov M.A. Remote consequences of acute peat smoke intoxication during puberty in an animal experiment. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1043–1048. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1043-1048> <https://elibrary.ru/lcaasv> (In Russ.)

**For correspondence:** Vera A. Vokina, e-mail: vokina.vera@gmail.com

**Contribution:** Vokina V.A. — concept and design of the study, conducting the experiment, processing, analyzing and interpreting data, reviewing publications on the topic of the article; writing and design of the article; Sosodova L.M. — research methodology, writing and formatting of the article, checking of critical content; Pankova A.A. — conducting the experiment, collecting and initially processing the material, statistical processing of data; Abramova V.A. — collecting and pre-processing the material, statistical processing of data, preparing illustrations; Titov E.A. — collecting and pre-processing the material, statistical processing of data, preparing illustrations; Novikov M.A. — collecting and pre-processing the material, statistical processing of data, preparing illustrations. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The work was carried out according to the research plan within the framework of the state task.

Received: April 13, 2026 / Revised: June 2, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Многие эпидемиологические исследования последних лет посвящены влиянию дыма природных пожаров (ПП) на здоровье людей. Значительная часть этих исследований охватывает все возрастные категории [1], но мало внимания уделяется группам населения с повышенной уязвимостью, в том числе детям и подросткам [2, 3]. Дети и подростки особенно чувствительны к загрязнению воздуха из-за повышенной частоты дыхания, большей скорости нейронных изменений и продолжительности времени, проводимого на открытом воздухе [4]. Дети в отличие от взрослых имеют менее эффективную назальную фильтрацию, поэтому в их лёгкие может проникать большее количество твёрдых частиц [5]. Воздействие дыма ПП традиционно связывают с неблагоприятными последствиями для сердечно-сосудистой и респираторной систем, в то время как нейротоксический профиль продуктов горения биомассы изучен недостаточно. Поскольку структура и функции мозга человека продолжают созревать вплоть до 30 лет [6], нейротоксическое влияние дыма может проявляться на протяжении всего динамического процесса нейроразвития в результате воздействия в детстве или в подростковом периоде [7]. Отдалённые последствия нарушений здоровья при воздействии дыма ПП на детей и подростков в настоящее время неизвестны [8]. В связи с этим целью настоящего исследования была оценка отдалённых последствий у белых крыс обоего пола после однократной экспозиции торфяным дымом в период полового созревания.

## Материалы и методы

В качестве источника биомассы использовали пробы торфа, отобранные на месте осушенных торфяных болот в Ангарском районе. Животных подвергали однократно воздействию дыма в течение четырёх часов с помощью ранее разработанного устройства для моделирования интоксикации продуктами горения биомассы у мелких лабораторных животных [9]. Для контроля воздушной среды в экспозиционной камере каждый час с помощью газоанализатора ГАНК-4 (НПО «Прибор», Россия) определяли концентрации оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>). Концентрацию твёрдых частиц размером менее 2,5 мкм (PM<sub>2.5</sub>) измеряли пылевым анализатором DustTrak 8533 (TSI Incorporated, США). Температуру воздуха и относительную влажность в экспозиционных камерах поддерживали в диапазонах плюс 24–25 °C и 40–50% соответственно. Животным контрольной группы (10 самцов, 10 самок) в камеру подавали чистый воздух. Критериями уровня задымления были концентрации PM<sub>2.5</sub> и CO.

Целевые значения концентраций твёрдых частиц находились в диапазоне, зарегистрированном в атмосферном воздухе во время торфяных пожаров [10, 11]. С помощью программы MPPD (Multiple Path Particle Dosimetry V3.04) оценивали общее осаждение частиц, осаждение в верхних дыхательных путях, трахеобронхиальной и альвеолярной зонах лёгких белых крыс с использованием модели Semi-symmetric Long-Evans (полусимметричная модель дыхательных путей лёгких крысы) [12].

Экспозицию торфяным дымом проводили в период полового созревания — на 35-й день жизни (P35) для самок белых крыс ( $n = 10$ ) и на 45-й день (P45) для самцов ( $n = 10$ ). Выбор данных периодов воздействия обусловлен тем, что у белых крыс половое созревание происходит между P30 и P42 у самок и P42 и P55 у самцов, при этом регулярные эстральные циклы и наличие зрелых сперматозоидов в семявыносящих протоках являются показателями завершения этой стадии развития у самок и самцов соответственно [13].

Оценку отдалённых последствий интоксикации крыс торфяным дымом проводили в возрасте трёх месяцев (период половозрелости). Анализировали показатели поведения в тесте «открытое поле», результаты электроэнцефалографии (ЭЭГ), выполняли забор крови для оценки уровня фрагментации ДНК и гистологическое исследование нервной ткани и ткани семенников. Тестирование в «открытом поле» проводили в течение трёх минут с использованием АПК EthoStudio (Россия) [14] с автоматической регистрацией исследованной площади, времени нахождения животного в центре, вертикальной активности и пройденного пути. ЭЭГ выполняли с помощью подкожных игольчатых электродов с использованием электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-1/В» (Нейрософт, Россия) по ранее описанной методике [15]. Для оценки уровня фрагментации ДНК кровь отбирали из хвостовой вены через сутки после окончания затравки. Особым группой позитивного контроля ( $n = 5$ ) вводили метилметансульфонат в дозе 40 мг/кг внутривенно однократно за 24 ч до забоя. Условия проведения щелочного гель-электрофореза и визуализации полученных изображений описаны нами ранее [15]. Выведение животных из эксперимента осуществляли методом декапитации, после чего производили забор головного мозга и семенников для гистологических исследований. Материалом для микроскопического исследования служили сенсомоторная зона коры головного мозга и сперматогенный эпителий, из которых изготавливали послойные серийные срезы толщиной 5 мкм. В препаратах, окрашенных гематоксилином и эозином, подсчитывали следующие показатели: в ткани мозга — число дегенеративно изменённых нейронов и число актов нейронафагии; в ткани семенника — индекс сперматогенеза, количество семенных канальцев.

Таблица 1 / Table 1

**Результаты тестирования в «открытом поле» крыс, экспонированных торфяным дымом**  
**Results of open field testing in rats exposed to peat smoke**

| Показатель<br>Parameters                             | Самки   Females    |                   | Самцы   Males      |                   |
|------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                                                      | Контроль   Control | Опыт   Experiment | Контроль   Control | Опыт   Experiment |
| Нахождение в центре, с   Time spent in the center, s | 0.4 (1.2; 4.0)     | 0.9 (0.3; 4.3)    | 0.4 (0.1; 2.2)     | 1.4 (0.2; 5.6)    |
| Площадь исследованной арены, %   Explored area, %    | 52 (47; 60)        | 44 (38; 53)       | 40 (36; 45)        | 39 (34; 45)       |
| Пройденный путь, см   Traveled distance, cm          | 8.9 (8.2; 9.4)     | 6.1 (5.7; 6.8)*   | 7.6 (7.1; 8.3)     | 5.8 (5.4; 6.7)*   |
| Количество вертикальных стоек   Number of rearings   | 23 (20; 26)        | 17 (16; 18)*      | 16 (14; 18)        | 11 (9; 15)*       |

Примечание. Здесь и в табл. 2: \* — статистически значимые изменения при  $p < 0,05$ .

Note: Here and in Table 2: \* — statistically significant changes at  $p < 0.05$ .

Статистический анализ результатов исследования выполняли с помощью пакета прикладных программ Statistica 6.1. (StatSoft) (лицензия № AXXR004E642326FA). Предварительно был проведён анализ полученных данных для определения вида распределения (*W*-критерий Шапиро — Уилка). Для сравнения групп применяли *U*-критерий Манна — Уитни. Нулевые гипотезы об отсутствии различий между группами отвергали при достигнутом уровне значимости  $p \leq 0,05$ . Результаты представлены в виде медианы и интерквартильного размаха *Me* ( $Q_{25}$ ;  $Q_{75}$ ).

## Результаты

Использование разработанной нами ранее экспериментальной модели торфяного пожара позволило создать в заправочной камере задымление, близкое к натурным условиям. На рис. 1 (см. на вклейке) представлены результаты замеров проб воздуха в камере при моделировании пожарной эмиссии. Средние концентрации СО и  $PM_{2,5}$  в экспозиционных камерах составили  $29,3 \pm 11,1$  и  $0,39 \pm 0,61$  мг/м<sup>3</sup> соответственно и характеризовались достаточно высоким уровнем вариабельности. Наблюдаемые величины превышают ПДК<sub>м.р.</sub> в атмосферном воздухе по содержанию СО в 6 раз, по содержанию  $PM_{2,5}$  — в 2,4 раза. При этом содержание СО<sub>2</sub> не превышало  $0,62 \pm 0,16$  об.%, а концентрация кислорода находилась в пределах  $19,1 \pm 0,2\%$ . Уровень воздействия торфяного дыма по содержанию СО и  $PM_{2,5}$  в настоящем исследовании соотносится с данными о загрязнении воздуха в населённых пунктах, пострадавших от дыма ПП [10, 11]. В исследованиях Reinhardt (2004) было показано, что содержание оксида углерода коррелирует с основными компонентами дыма от сжигания биомассы, такими как акролеин, бензол, формальдегид и респираторные твёрдые частицы, что позволяет считать его количественным индикатором воздействия дыма [16]. Вместе с тем в большинстве исследований, посвящённых изучению влияния дыма ПП на здоровье человека, основным критерием загрязнения воздуха считают содержание  $PM_{2,5}$  [17].

Осаждаемая фракция частиц  $PM_{2,5}$ , рассчитанная для белых крыс моделью MPPD, в условиях данной экспозиции составила 93,4% для верхних дыхательных путей, 3,67% для трахеобронхиальной зоны и 1,67% для альвеолярной зоны. По данным компьютерного моделирования, у крыс скорость осаждения  $PM_{2,5}$  в носовой полости, носоглотке, носоглоточных путях значительно превышает таковую в других отделах лёгких и при концентрации  $PM_{2,5}$  на уровне  $0,39$  мг/м<sup>3</sup> составляет  $6,73E-03$  мкг/мин, в зоне трахеи, бронхов и бронхиол —  $1,37E-04$  мкг/мин, в зоне альвеол —  $4,41E-07$  мкг/мин. С учётом полученных данных нами рассчитана депонированная доза  $PM_{2,5}$  на единицу площади у крыс за время экспозиции длительностью 4 ч, составившая в трахеобронхиальной и альвеолярной зонах дыхательных путей 33 и  $0,106$  нг/см<sup>2</sup> соответственно. На основании расчётов за время экспозиции осели в верхних дыхательных путях белых крыс  $1,62$  мкг/см<sup>2</sup> частиц  $PM_{2,5}$ .

При анализе полученных результатов тестирования в «открытом поле» белых крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма, выявлено снижение двигательной активности у экспонированных животных обоего пола, о чём свидетельствовало уменьшение пути, пройденного самцами и самками ( $p = 0,0018$  и  $p = 0,0024$  соответственно). Данные представлены в табл. 1. Последствием экспозиции торфяным дымом было также значительное угнетение исследовательской активности белых крыс, проявлявшееся снижением количества вертикальных стоек у самцов и самок по сравнению с контролем ( $p = 0,027$  и  $p = 0,003$  соответственно; см. табл. 1).

Результаты ЭЭГ половозрелых самцов белых крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в период полового созревания, не показали статистически значимых отличий от контроля (табл. 2). ЭЭГ самок характеризовалась статистически значимым снижением ( $p = 0,048$ ) средней амплитуды  $\beta_2$ -ритма на 38% по сравнению с показателями контрольной группы (см. табл. 2). Спектральный анализ показал статистически значимое повышение индекса  $\delta$ -ритма у самок в 2,1 раза ( $p = 0,023$ ) и тенденцию к снижению индекса  $\beta_2$ -ритма ( $p = 0,074$ ) по сравнению с контролем.

При гистологическом исследовании ткани сенсомоторной коры головного мозга животных, подвергавшихся однократному воздействию торфяного дыма в период полового созревания, не выявлено значительных нарушений. Кровенаполнение сосудов вещества мозга у всех животных было в норме, изменений сосудистых стенок и оболочек не выявлено. При морфометрическом анализе дегенеративно изменённых нейронов, а также определения числа актов нейронафагии не выявлено статистически значимых отличий от показателей контрольной группы (рис. 2, см. на вклейке).

При макроскопическом исследовании семенников половозрелых белых крыс, подвергавшихся однократному воздействию торфяного дыма в период полового созревания, наблюдалось умеренное кровенаполнение, не отличающееся от нормы. Нарушений реологии крови выявлено не было. Сосудистые стенки не изменены, кровоизлияний не обнаружено. Извитые каналы нормального размера, просветы в норме. Собственная оболочка различается по всей поверхности, без утолщений и разрывов. По результатам морфометрического исследования основных функциональных показателей деятельности семенников белых крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма, статистически значимые отличия от контрольной группы не выявлены (рис. 3, см. на вклейке).

Уровень фрагментации ДНК в лейкоцитах самцов и самок белых крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в период полового созревания, по достижении ими половозрелого возраста составил 3,4 (2,6; 4,2) и 1,6 (1,3; 5,2)% соответственно, в то время как в контрольной группе данный показатель составил 3,8 (3; 4,7) и 5 (4,8; 5,1)% соответственно ( $p = 0,54$  и  $p = 0,38$ ). Повреждённость ДНК клеток крови у особой группы позитивного контроля в данном эксперименте составила 28,3 (19,6–39,8)%, что свидетельствовало

Таблица 2 / Table 2

## Результаты ЭЭГ взрослых белых крыс

## Results of EEG examination in adult rats

| Показатель<br>Index                                                       | Диапазон частот ЭЭГ<br>EEG frequency range | Самки   Females    |                   | Самцы   Males      |                   |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                                                                           |                                            | Контроль   Control | Опыт   Experiment | Контроль   Control | Опыт   Experiment |
| Средняя амплитуда спектров ЭЭГ, мкВ<br>Mean amplitude of EEG spectra (μV) | δ                                          | 3.1 (2.5; 3.6)     | 3.1 (2.1; 4.0)    | 3.5 (2.8; 6.9)     | 3.1 (2.1; 4.2)    |
|                                                                           | θ                                          | 1.8 (1.6; 2.2)     | 1.6 (1.5; 1.7)    | 1.7 (1.6; 1.8)     | 1.6 (1.1; 1.7)    |
|                                                                           | α                                          | 1.2 (0.8; 1.3)     | 0.9 (0.7; 1.1)    | 0.9 (0.9; 1.1)     | 1.0 (0.7; 1.2)    |
|                                                                           | β1                                         | 0.6 (0.5; 0.6)     | 0.4 (0.3; 0.5)    | 0.5 (0.4; 0.7)     | 0.5 (0.4; 0.6)    |
|                                                                           | β2                                         | 0.4 (0.3; 0.4)     | 0.3 (0.2; 0.3)*   | 0.4 (0.3; 0.6)     | 0.4 (0.3; 0.4)    |
| Индекс ритма, %<br>Rhythm index, %                                        | δ                                          | 0.8 (0.5; 1.0)     | 1.7 (1.2; 2.8)*   | 0.6 (0.5; 1.2)     | 0.5 (0.4; 0.7)    |
|                                                                           | θ                                          | 10.6 (10.0; 12.2)  | 11.4 (8.9; 15.2)  | 7.5 (6; 9.1)       | 7.2 (5.8; 9.9)    |
|                                                                           | α                                          | 26.7 (24.2; 29.0)  | 25.7 (16.2; 29.6) | 18.8 (18.1; 22.2)  | 23.2 (18.6; 32.1) |
|                                                                           | β1                                         | 15.4 (14.3; 18.0)  | 17.2 (14.9; 18.2) | 15.5 (13.5; 16.9)  | 15.2 (13.3; 18.0) |
|                                                                           | β2                                         | 23.2 (20.6; 26.4)  | 18 (13.6; 20.2)   | 29.0 (22.3; 29.2)  | 24.7 (20.9; 26.3) |

об объективности эксперимента. Во всех исследуемых группах белых крыс незначительное повреждение ДНК (до 10%) в лейкоцитах или его отсутствие наблюдалось в 93–95% клеток. Клетки со значительными повреждениями (от 10 до 30% повреждённой ДНК) обнаружены у опытных самцов и самок (от 5–6%), при этом статистически значимых отличий от группы контроля (6–11%) выявлено не было. Количество апоптоз-положительных клеток во всех изученных группах животных не превышало 2%.

## Обсуждение

Воздействие дыма ПП неизменно ассоциируется с повышенным риском неблагоприятных последствий для здоровья детей и подростков, преимущественно со значительным увеличением числа обращений в отделения неотложной помощи по причине респираторных патологий и госпитализаций при обострении астмы [18]. В большинстве исследований доказана связь респираторной патологии с содержанием в воздухе твёрдых частиц, в основном с  $PM_{2.5}$ , в условиях задымления. Проведённое исследование направлено на оценку отдалённых последствий воздействия дыма ПП для ЦНС и репродуктивной системы при моделировании условий, близких к натурным по содержанию  $PM_{2.5}$  и СО. Использование модели MPPD позволило оценить осаждение аэрозоля  $PM_{2.5}$  в дыхательных путях белых крыс за всё время экспозиции. По результатам компьютерного моделирования при концентрации  $PM_{2.5}$  на уровне  $0.39 \text{ мг/м}^3$  у крыс значительная часть аэрозоля депонируется в верхних дыхательных путях, составляя 93,4% от общей фракции, в то время как у взрослого человека данный показатель составляет 29,9%, у подростка – 25–26%. Депонированная доза  $PM_{2.5}$  в трахеобронхиальной и альвеолярной зонах дыхательных путей белых крыс составила 33 и  $0,106 \text{ нг/см}^2$  соответственно, то есть 5,3% от общей массы осевших частиц в дыхательных путях. В связи с этим экстраполяция на человека респираторных эффектов, наблюдаемых у крыс и ассоциированных с воздействием только  $PM_{2.5}$ , может быть затруднительна.

У белых крыс нейротоксическое действие  $PM_{2.5}$  в составе дыма ПП может проявляться в значительной степени из-за особенностей процесса дыхания (крысы относятся к облигатно дышащим) и миграции токсичных компонентов с поверхности твёрдых частиц по обонятельным нервам непосредственно в обонятельные луковицы, а затем в глубокие отделы мозга (гиппокамп, кору) [19]. В настоящем исследовании однократное воздействие торфяного дыма в период полового созревания привело к изменению структуры поведения и показателей ЭЭГ взрослых особей при сохранении нормальной гистологической картины ткани сенсомотор-

ной коры головного мозга. Самцы и самки белых крыс в половозрелом возрасте демонстрировали однонаправленные изменения показателей поведения, выразившиеся в снижении горизонтальной и вертикальной активности. Следует отметить, что нейрофизиологические показатели ЭЭГ были изменены только у самок крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в подростковом возрасте.

Вероятно, в основе выявленных у крыс этологических нарушений лежат функциональные изменения ЦНС, связанные в первую очередь с процессами нейровоспаления и нейромедиаторного обмена. Данное предположение подтверждается исследованиями Scieszka D. и соавт., которые показали, что воздействие твёрдых частиц дыма лесных пожаров в течение 20 дней вызывает устойчивые функциональные нарушения ЦНС у самцов мышей (нейровоспаление, метаболический сдвиг, проаггегантный статус Аβ), которые происходят при сохранной макро- и микроструктуре ткани головного мозга, но являются достаточными для формирования серьёзных этологических нарушений и долгосрочного риска нейродегенерации [20].

Возможно, воздействие торфяного дыма в период полового созревания, когда непрерывно протекают процессы совершенствования и созревания нейронных цепей, изменяет синаптическую пластичность и потенциально способствует развитию депрессивного поведения. Хотя в рамках данного исследования не были использованы классические тесты, позволяющие оценить степень депрессивноподобного поведения у белых крыс, мы можем предположить его наличие по значительному снижению двигательной (на 24–31%) и исследовательской (на 26–31%) активности в тесте «открытое поле». Данный тест базируется на оценке тревожности, которая является одним из наиболее распространённых симптомов депрессии. При исключении моторного дефицита низкий уровень локомоций и ориентировочно-исследовательского поведения является надёжным критерием депрессивноподобного состояния [21]. Связь между воздействием  $PM_{2.5}$  атмосферного воздуха и развитием депрессии у крыс описана в работе Kim H.J. и соавт., в которой показано, что интраназальное введение  $PM_{2.5}$  белым крысам в течение 28 дней вызывает депрессивноподобное поведение через пути стресса эндоплазматического ретикулума и окислительного стресса в гипоталамусе, приводя к дофаминергической дисфункции [22]. В литературе также есть данные о роли  $PM_{2.5}$  в развитии болезней аутистического спектра [23]. Так, отдалённые эффекты  $PM_{2.5}$  описаны в работе Li K. и соавт. Авторы обнаружили, что при воздействии  $PM_{2.5}$  в ранний неонатальный период в течение двух недель крысы проявляли типичные поведенческие признаки аутизма, в том числе нарушения коммуникации, плохое социальное взаимодействие и избегание новизны [24].

Имеющиеся в современной литературе данные свидетельствуют о том, что ПП оказывают негативное влияние на психическое здоровье жителей пострадавших районов, часто приводя к снижению психологической адаптации и общего благополучия [25]. Исследование, проведённое в отдалённом периоде после масштабного ПП (через 18 мес) в Канаде, сопровождавшегося эвакуацией целого города, показало, что симптомы у 37% учащихся 7–12-х классов соответствовали критериям посттравматического стрессового расстройства (ПТСР), 31% — клинически значимой депрессии, а 17% — критериям депрессии как минимум средней степени тяжести [26]. С учётом значительного влияния таких психосоциальных факторов в условиях ПП, как фактическая близость к месту пожара, объективная угроза жизни и имуществу, невозможно определить роль загрязнения воздуха продуктами горения в развитии нарушений психического здоровья без проведения специализированных экспериментальных исследований. Растущая активность ПП и увеличение числа населённых пунктов вблизи зон риска определяют важность разработки стратегий снижения последствий и формирования адаптации, направленных на минимизацию негативного воздействия выбросов от лесных пожаров на здоровье уязвимых групп населения, в том числе детей и подростков.

При исследовании клеток крови методом ДНК-комет статистически значимых изменений фрагментации ДНК белых крыс после воздействия торфяного дыма в подростковом возрасте не выявлено. Полученные данные могут свидетельствовать как о высокой эффективности процессов репарации ДНК у белых крыс в данные периоды жизни, так и о том, что повреждение ДНК не является доминирующим механизмом токсичности торфяного дыма в рамках данной экспериментальной модели.

Особый интерес представляет влияние дыма ПП на репродуктивную систему. В нашем исследовании у взрослых половозрелых самцов белых крыс не было выявлено гонадотоксического эффекта после острой экспозиции торфяным дымом в подростковом возрасте. Однако результаты современных эпидемиологических исследований свидетельствуют о связи между воздействием дыма ПП и повышенным риском мужского бесплодия у пожарных [27, 28], что предполагает высокую уязвимость мужской репродуктивной системы к воздействию дыма ПП. Анализ клинических и экспериментальных данных позволяет предположить, что существует временной порог, разграничивающий функциональные нарушения (подвижность сперматозоидов) и структурные (индекс сперматогенеза): на начальных этапах или при невысокой интенсивности задымления страдает в первую очередь функция семенников, в то время как структурная целост-

ность сперматогенного эпителия может оставаться сохранённой. Кроме того, можно предположить, что воздействие дыма повреждает популяцию зрелых клеток, снижая общую подвижность в эякуляте, в то время как пул сперматогоний (стволовых клеток) остаётся нетронутым, что сохраняет нормальный индекс сперматогенеза. В настоящем исследовании не проводилась оценка функционального состояния сперматогенного эпителия, однако предыдущие исследования свидетельствовали о нарушении постнатального развития потомства первого поколения, полученного от самцов, заправленных торфяным дымом в аналогичном режиме [29]. Известно, что период полового созревания характеризуется активным эпигенетическим ремоделированием [30]. Воздействие токсических веществ в данный период может оказать влияние на экспрессию генов, определяющих функцию репродуктивной системы на протяжении всей последующей жизни. Поэтому мы предполагаем, что репродуктивный эффект острого воздействия торфяного дыма в период полового созревания может быть связан как со снижением качества спермы белых крыс, так и с изменением эпигенетического статуса сперматозоидов.

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (протокол № 7 от 15.12.2023 г.), проведено в соответствии с Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123), директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей.

**Ограничения исследования.** Данное исследование ограничено изучением отдалённых последствий однократного воздействия торфяного дыма для ЦНС и репродуктивной системы белых крыс в период полового созревания.

## Заключение

Полученные результаты подчёркивают необходимость дальнейших исследований влияния дыма ПП на нервную и репродуктивную системы, что особенно актуально в условиях прогнозируемого увеличения частоты и масштабов ПП при изменении климата. Отдалённые последствия нахождения на задымлённой ПП территории, в том числе в удалённых от очагов возгорания населённых пунктах, в настоящее время в должной мере не изучены и не оценены, особенно это касается уязвимых категорий населения. Подростковый возраст является одним из наиболее уязвимых периодов, и последствия воздействия экотоксикантов могут быть необратимыми и проявляться спустя десятилетия во взрослом возрасте.

## Литература

(п.п. 1–8, 10–20, 22–28, 30 см. References)

9. Вокина В.А., Андреева Е.С., Новиков М.А., Соседова Л.М. Устройство для моделирования интоксикации у мелких лабораторных животных продуктами горения биомассы. Патент РФ № 213283U1; 2022. <https://elibrary.ru/rvksqf>
21. Ушакова В.М., Горлова А.В., Зубков Е.А., Морозова А.Ю., Зоркина Я.А., Павлов Д.А. и др. Экспериментальные модели депрессивного состояния. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2019; 69(2): 230–47. <https://doi.org/10.1134/S0044467719020114> <https://elibrary.ru/vvvwhc>
29. Панкова А.А., Вокина В.А., Соседова Л.М., Рукавишников В.С. Воздействие торфяного дыма как фактор риска нарушения постнатального развития. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(9): 1044–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-1044-1049> <https://elibrary.ru/cnagdo>

## References

1. Gao Y., Huang W., Yu P., Xu R., Yang Z., Gasevic D., et al. Long-term impacts of non-occupational wildfire exposure on human health: a systematic review. *Environ. Pollut.* 2023; 121041. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121041> <https://elibrary.ru/tterky>
2. Aguilera R., Corringham T., Gershunov A., Leibel S., Benmarhnia T. Fine particles in wildfire smoke and pediatric respiratory health in California. *Pediatrics*. 2021; 147(4): e2020027128. <https://doi.org/10.1542/peds.2020-027128> <https://elibrary.ru/uoaifm>
3. Moore L.E., Oliveira A., Zhang R., Behjat L., Hicks A. Impacts of wildfire smoke and air pollution on a pediatric population with asthma: a population-based study. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023; 20(3): 1937. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031937> <https://elibrary.ru/hhycbl>
4. Sunyer J. The neurological effects of air pollution in children. *Eur. Respir. J.* 2008; 32(3): 535–7. <https://doi.org/10.1183/09031936.00073708>
5. Bennett W.D., Zeman K.L., Jarabek A.M. Nasal contribution to breathing and fine particle deposition in children versus adults. *J. Toxicol. Environ. Health A*. 2008; 71(3): 227–37. <https://doi.org/10.1080/15287390701598200>
6. Tammes C.K., Herting M.M., Goddings A.L., Meuwese R., Blakemore S.J., Dahl R.E., et al. Development of the cerebral cortex across adolescence: a multisample study of inter-related longitudinal changes in cortical volume, surface area, and thickness. *J. Neurosci.* 2017; 37(12): 3402–12. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3302-16.2017>
7. Herting M.M., Younan D., Campbell C.E., Chen J.C. Outdoor air pollution and brain structure and function from across childhood to young adulthood:

- a methodological review of brain MRI studies. *Front. Public Health*. 2019; 7: 332. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00332> <https://elibrary.ru/elwcvh>
8. Holm S.M., Miller M.D., Balmes J.R. Health effects of wildfire smoke in children and public health tools: a narrative review. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2021; 31(1): 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-00267-4> <https://elibrary.ru/bqyfvu>
  9. Vokina V.A., Andreeva E.S., Novikov M.A., Sosedova L.M. Device for modeling intoxication in small laboratory animals with biomass combustion products. Patent RF № 213283U1; 2022. (in Russian)
  10. Tinling M.A., West J.J., Cascio W.E., Kilaru V., Rappold A.G. Repeating cardiopulmonary health effects in rural North Carolina population during a second large peat wildfire. *Environ. Health*. 2016; 15: 12. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0113-4> <https://elibrary.ru/wuvgtv>
  11. Artaxo P., Gerab F., Yamasoe M.A., Martins J. Fine mode aerosol composition at three long-term atmospheric monitoring sites in the Amazon Basin. *J. Geophys. Res.* 1994; 99(D11): 22857–68. <https://doi.org/10.1029/94JD01023>
  12. Multiple-Path Particle Dosimetry Model (MPPD v 3.04). Available at: <https://ara.com/mppd/>
  13. Bell M.R. Comparing postnatal development of gonadal hormones and associated social behaviors in rats, mice, and humans. *Endocrinology*. 2018; 159(7): 2596–613. <https://doi.org/10.1210/en.2018-00220>
  14. Kulikov A.V., Tikhonova M.A., Kulikov V.A. Automated measurement of special preference in the open field test with transmitted lighting. *J. Neurosci. Methods*. 2008; 170(2): 345–51. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.01.024> <https://elibrary.ru/ljlzlh>
  15. Vokina V.A., Sosedova L.M., Novikov M.A., Rukavishnikov V.S., Kapustina E.A., Alekseenko A.N., et al. Alterations in CNS functions and DNA methylation in rats after 24 h exposure to peat smoke. *Toxics*. 2021; 9(12): 342. <https://doi.org/10.3390/toxics9120342> <https://elibrary.ru/zhffie>
  16. Reinhardt T.E., Ottmar R.D. Baseline measurements of smoke exposure among wildland firefighters. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2004; 1(9): 593–606. <https://doi.org/10.1080/15459620490490104>
  17. Naeher L.P., Brauer M., Lipsett M., Zelikoff J.T., Simpson C.D., Koenig J.Q., et al. Woodsmoke health effects: a review. *Inhal. Toxicol.* 2007; 19(1): 67–106. <https://doi.org/10.1080/08958370600985875>
  18. Henry S.L., Ospina M.B., Dennett L., Hicks A. Assessing the risk of respiratory related healthcare visits associated with wildfire smoke exposure in children 0–18 years old: a systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(16): 8799. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168799> <https://elibrary.ru/ondbiv>
  19. Wei S., Xu T., Sang N., Yue H., Chen Y., Jiang T., et al. Mixed metal components in PM2.5 contribute to chemokine receptor CCR5-mediated neuroinflammation and neuropathological changes in the mouse olfactory bulb. *Environ. Sci. Technol.* 2024; 58(11): 4914–25. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08506> <https://elibrary.ru/dxgbaa>
  20. Scieszka D., Jin Y., Noor S., Barr E., Garcia M., Begay J., et al. Biomass smoke inhalation promotes neuroinflammatory and metabolomic temporal changes in the hippocampus of female mice. *J. Neuroinflammation*. 2023; 20(1): 192. <https://doi.org/10.1186/s12974-023-02874-y> <https://elibrary.ru/ospvbe>
  21. Ushakova V.M., Gorlova A.V., Zubkov E.A., Morozova A.U., Zorkina Ya.A., Pavlov D.A., et al. Experimental models of depressive disorder. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti im. I.P. Pavlova*. 2019; 69(2): 230–47. <https://doi.org/10.1134/S0044467719020114> <https://elibrary.ru/vvwhc> (in Russian)
  22. Kim H.J., Kim J.H., Lee S., Do P.A., Lee J.Y., Cha S.K., et al. PM2.5 exposure triggers hypothalamic oxidative and ER stress leading to depressive-like behaviors in rats. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25(24): 13527. <https://doi.org/10.3390/ijms252413527> <https://elibrary.ru/fhxzyj>
  23. Flores-Pajot M.C., Ofner M., Do M.T., Lavigne E., Villeneuve P.J. Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: a review and meta-analysis. *Environ. Res.* 2016; 151: 763–76. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.030>
  24. Li K., Li L., Cui B., Gai Z., Li Q., Wang S., et al. Early postnatal exposure to airborne fine particulate matter induces autism-like phenotypes in male rats. *Toxicol. Sci.* 2018; 162(1): 189–99. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfx240>
  25. Marshall G.N., Schell T.L., Elliott M.N., Rayburn N.R., Jaycox L.H. Psychiatric disorders among adults seeking emergency disaster assistance after a wildland-urban interface fire. *Psychiatr. Serv.* 2007; 58(4): 509–14. <https://doi.org/10.1176/ps.2007.58.4.509>
  26. Brown M.R., Agyapong V., Greenshaw A.J., Cribben I., Brett-MacLean P., Drolet J., et al. Significant PTSD and other mental health effects present 18 months after the Fort McMurray wildfire: findings from 3,070 grades 7–12 students. *Front. Psychiatry*. 2019; 10: 623. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2019.00623>
  27. Lindell L.X., Holt S.K., Petersen E., Gunaje N., Amighi A., Haack A., et al. Wildfire smoke exposure is associated with decreased sperm concentration and total motile sperm count. *Fertil. Steril.* 2026; 125(2): 316–25. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2025.08.031> <https://elibrary.ru/yorzbi>
  28. Ramsay J.M., Horns J.J., Emery B.R., Aston K.I., Hotaling J.M. Exposure to wildfire smoke is associated with decreased semen quality. *Fertil. Steril.* 2024; 122(4 Suppl.): e210. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2024.07.690> <https://elibrary.ru/iwkleml>
  29. Pankova A.A., Vokina V.A., Sosedova L.M., Rukavishnikov V.S. Peat smoke exposure as a risk factor for deterioration of postnatal development. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(9): 1044–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-1044-1049> <https://elibrary.ru/cnagdo> (in Russian)
  30. Ho S.M., Cheong A., Adgent M.A., Veevers J., Suen A.A., Tam N.N.C., et al. Environmental factors, epigenetics, and developmental origin of reproductive disorders. *Reprod. Toxicol.* 2017; 68: 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2016.07.011>

## Сведения об авторах

**Вокина Вера Александровна**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия. E-mail: [vokina.vera@gmail.com](mailto:vokina.vera@gmail.com)

**Соседова Лариса Михайловна**, доктор мед. наук, профессор, зав. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия. E-mail: [sosedlar@mail.ru](mailto:sosedlar@mail.ru)

**Панкова Анна Александровна**, мл. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия. E-mail: [anna.trofnikova.96@bk.ru](mailto:anna.trofnikova.96@bk.ru)

**Абрамова Вера Александровна**, канд. фарм. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия. E-mail: [tyutrina.v.a@yandex.ru](mailto:tyutrina.v.a@yandex.ru)

**Титов Евгений Александрович**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия. E-mail: [tox\\_lab@mail.ru](mailto:tox_lab@mail.ru)

**Новиков Михаил Андреевич**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия.

## About the authors

**Vera A. Vokina**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of Biomodeling and Translational Medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8165-8052> E-mail: [vokina.vera@gmail.com](mailto:vokina.vera@gmail.com)

**Larisa M. Sosedova**, DSc (Medicine), professor, head, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1052-4601> E-mail: [sosedlar@mail.ru](mailto:sosedlar@mail.ru)

**Anna A. Pankova**, junior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6012-0173> E-mail: [anna.trofnikova.96@bk.ru](mailto:anna.trofnikova.96@bk.ru)

**Vera A. Abramova**, PhD (Pharmacy), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9406-5424> E-mail: [tyutrina.v.a@yandex.ru](mailto:tyutrina.v.a@yandex.ru)

**Evgeniy A. Titov**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0665-8060> E-mail: [tox\\_lab@mail.ru](mailto:tox_lab@mail.ru)

**Mikhail A. Novikov**, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6100-6292> E-mail: [tox\\_lab@mail.ru](mailto:tox_lab@mail.ru)



Новиков М.А., Титов Е.А., Панкова А.А., Лисецкая Л.Г., Соседова Л.М.

## Гистоморфологическая оценка перорального воздействия нанокompозита гадолиния на почки и печень белых крыс

ФГБНУ Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований, 665826, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Перспектива использования наночастиц гадолиния для достижения высокой контрастности изображений при выполнении МРТ со значительно меньшим количеством вводимого вещества диктует необходимость его всестороннего изучения. Высокая эффективность наночастиц может достигаться только за счёт наностабилизирующей матрицы. К таким высокомолекулярным соединениям относится арабиногалактан, выделяемый из древесины лиственницы сибирской.

**Материалы и методы.** Нанокompозит гадолиния, инкапсулированного в природную полимерную матрицу арабиногалактана, вводили *per os* в течение 10 дней взрослым половозрелым белым крысам-самцам ( $n = 72$ ) в дозах 500 и 5000 мкг/кг массы тела соответственно. Исследование проходило в два этапа: сразу после окончания затравки (ранний период) и через 6 мес после окончания экспонирования (отдалённый период). В работе применяли комплекс методов, позволяющих оценить структурно-функциональное состояние почек и печени, а также определить концентрацию гадолиния в вышеуказанных органах.

**Результаты.** Структурно-функциональные особенности воздействия нанокompозита гадолиния на ткань почек выражались в изменении площади капсулы Шумлянского — Боумена как в раннем, так и в отдалённом постконтактном периодах, однако такие изменения укладываются в параметры физиологической нормы для данного органа. При этом доказано, что нанокompозит способен проникать в ткани печени и почек, сохраняясь в них в отдалённом постконтактном периоде.

**Ограничения исследования.** Использование одного вида животных, ограниченное число используемых методик.

**Заключение.** Исследованные нами наночастицы гадолиния благодаря заданным физико-химическим характеристикам, практически полному отсутствию токсичности при воздействии на органы-мишени (почки, печень) являются перспективными лечебно-диагностическими препаратами, что в дальнейшем может быть использовано для создания диагностических препаратов нового поколения.

**Ключевые слова:** наночастицы; гадолиний; почки; печень; токсичность; морфология; гистология

**Соблюдение этических стандартов.** Работа выполнена в соответствии с протоколом экспериментальных исследований, принципами, изложенными в Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях ETS № 123, ГОСТ 33215—2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедуры», Recommendations for euthanasia of experimental animals: Part 1, Part 2. На проведение исследований получено разрешение Локального этического комитета (протокол № 8 от 15.12.2023 г.).

**Для цитирования:** Новиков М.А., Титов Е.А., Панкова А.А., Лисецкая Л.Г., Соседова Л.М. Гистоморфологическая оценка перорального воздействия нанокompозита гадолиния на почки и печень белых крыс. Гигиена и санитария. 2026; 105(9): 1049—1054. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1049-1054> <https://elibrary.ru/mrovmp>

**Для корреспонденции:** Новиков Михаил Александрович, e-mail: novik-imt@mail.ru

**Вклад авторов:** Новиков М.А. — концепция и дизайн исследования, обработка данных, редактирование, написание текста; Титов Е.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Панкова А.А. — сбор материала и обработка данных; Лисецкая Л.Г. — пробоподготовка материалов для определения концентрации, пересчёт первичных количественных данных; Соседова Л.М. — концепция и дизайн исследования, редактирование, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Использование ИИ.** Для поиска дополнительных источников литературы использовалось программное обеспечение на основе искусственного интеллекта DeepSeek V4 (дата использования: 19.03.2026 г.).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Поступила: 13.04.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Mikhail A. Novikov, Evgeny A. Titov, Anna A. Pankova, Lyudmila G. Lisetskaya, Larisa M. Sosedova

## Histo-morphological assessment of the oral effect of gadolinium nanocomposite on kidneys and liver of white rats

East Siberian Institute of Medical and Environmental Research, Angarsk, 665826, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The prospect of using gadolinium nanoparticles to achieve high-contrast images when performing MRI with a significantly lower amount of the injected substance dictates the need for its comprehensive study. The high efficiency of nanoparticles can be achieved only due to an effective nanostabilizing matrix, a high-molecular compound of arabinogalactan isolated from Siberian larch wood.

**Materials and methods.** Gadolinium nanocomposite encapsulated in a natural polymer matrix of arabinogalactan was administered *per os* for 10 days to adult mature male white rats (seventy two individuals) at a dose of 500 µg/kg body weight and 5000 µg/kg body weight, respectively. The examination took place in 2 stages — immediately after the end of the seed (early period) and 6 months after the end of exposure (remote period). A set of methods was used to assess the structural and functional state of the kidneys and liver, as well as determine the concentration of gadolinium in the above-mentioned organs.

**Results.** The structural and functional features of the gadolinium nanocomposite effect on kidney tissue were expressed in a change in the area of the Shumlyansky—Bowman capsule, both in the early and in the long-term post-exposure period, however, these changes fit into the parameters of the physiological norm for this organ, while it was proved that the nanocomposite is able to penetrate into the liver and kidney tissue, remaining there in the remote post-contact period.

**Limitations.** The use of one type of animal, a limited number of techniques used.

**Conclusion.** The gadolinium nanoparticles, due to their specified physico-chemical characteristics and the almost complete absence of toxicity to target organs (kidneys, liver), are promising therapeutic and diagnostic drugs, which can later be used to create new-generation diagnostic drugs.

**Keywords:** nanoparticles; gadolinium; kidneys; liver; toxicity; morphology; histology

**Compliance with ethical standards.** The work was carried out in accordance with the protocol of experimental research, the principles set out in the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experiments or Other Scientific Purposes ETS No. 123, GOST 33215–2014 “Guidelines for the care and care of laboratory animals. Rules of equipment of premises and organization of procedures”, Recommendations for euthanasia of experimental animals: Part 1, Part 2. Permission was obtained from the Local Ethics Committee to conduct research (Protocol No. 8 dated 12/15/2023).

**For citation:** Novikov M.A., Titov E.A., Pankova A.A., Lisetskaya N.G., Sosodova L.M. Histo-morphological assessment of the oral effects of gadolinium nanocomposite on the kidneys and liver of white rats. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1049–1054. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1049-1054> <https://elibrary.ru/mrovmp> (In Russ.)

**For correspondence:** Mikhail A. Novikov, e-mail: novik-imt@mail.ru

**Contribution:** Novikov M.A. — concept and design of research, data processing, editing, writing; Titov E.A. — concept and design of research editing; Pankova A.A. — collection of material and data processing; Lisetskaya L.G. — sample preparation of materials for concentration determination, recalculation of primary quantitative data; Sosodova L.M. — concept and research design, editing, and writing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Using AI.** To search for additional sources of literature, DeepSeek V4 artificial intelligence-based software was used (date of use — 03/19/2026).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study was carried out within the framework of the state assignment of the East Siberian Institute of Medical and Environmental Research.

Received: April 13, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Бурное развитие нанотехнологий и активное внедрение наноматериалов в различные сферы медицины, биотехнологий и промышленности обусловили формирование нового междисциплинарного направления — нанотоксикологии [1, 2], основные задачи которой связаны с идентификацией специфических рисков, обусловленных взаимодействием наноразмерных объектов с биологическими системами. Ключевым постулатом нанотоксикологии является положение о том, что переход вещества в наноразмерное состояние принципиально изменяет его физико-химические характеристики (удельную поверхность, реакционную способность, способность к проникновению через биологические барьеры), что делает экстраполяцию данных о токсичности макроформ на наночастицы некорректной и потенциально опасной [3–5]. В связи с этим одним из приоритетных направлений становится комплексная оценка безопасности новых наноматериалов, особенно демонстрирующих значительные функциональные преимущества перед традиционными аналогами. В связи с этим особый интерес представляют наночастицы на основе гадолиния [6]. Соединения гадолиния в макроформе (например, хелаты  $Gd^{3+}$ ) нашли широкое применение в качестве парамагнитных контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии (МРТ) [7]. Наночастицы могут вызывать более выраженное снижение тонуса скелетной мускулатуры, а также обладают способностью к нацеливанию на патологические очаги (опухоли и др.) за счёт эффекта повышенной проницаемости и удерживания (EPR-эффект) [8].

Несмотря на очевидные функциональные преимущества наночастиц гадолиния, их применение сопряжено с новыми, не до конца изученными рисками. Высокая реакционная способность наноповрхности, потенциальная возможность внутриклеточного накопления, длительная биоперсистенция в органах ретикулоэндотелиальной системы, а также возможное высвобождение токсичных ионов  $Gd^{3+}$  в кислой среде лизосом требуют всестороннего анализа. В отличие от хорошо изученных низкомолекулярных хелатов [7] данные о хронической токсичности, биораспределении, иммуногенности и влиянии на ключевые клеточные процессы (апоптоз, аутофагия, оксидативный стресс) для наночастиц гадолиния единичны.

Таким образом, необходимость комплексного доклинического изучения наночастиц гадолиния — от характеристики их физико-химических свойств до глубокого понимания молекулярных механизмов взаимодействия с организмом — критически важное условие обеспечения качественной оценки безопасности и успешного перехода этих перспективных агентов в клиническую практику.

## Материалы и методы

В качестве наностабилизирующей полимерной матрицы применялся природный полисахарид арабиногалактан, ранее уже использованный нами и нашими коллегами при оценке других металлических наночастиц [9]. Электрон-

ную микроскопию для определения распределения частиц по размерам выполняли на просвечивающем электронном микроскопе Leo 906 E (Zeiss, Германия), размеры металло-комплексных наночастиц составляли 1–72 нм, содержание гадолиния в образце — 8,5–11,5% [10], форма наночастиц и макромолекулы нанокompозита — сферическая.

Экспериментальные исследования биологических эффектов нанокompозита гадолиния (далее — GdAG) проведены на 72 беспородных белых крысах-самцах массой тела 180–240 г. Были сформированы три группы животных по 24 особи в каждой. Раствор GdAG вводили внутривенно в течение 10 дней в дозе 500 мкг/кг (опытная группа GdAG500) и в дозе 5000 мкг/кг (опытная группа GdAG5000) по гадолинию. Особым контрольной группы внутривенно вводили в аналогичном объёме (0,5 мл) NaCl 0,9%. Указанная минимальная доза в 500 мкг/кг была выбрана нами как пороговая доза в отношении эффекта, выходящего за пределы нормальных физиологических реакций у лабораторных животных (*d. toxica minima*) и подтверждена при исследовании других наночастиц в составе нанокompозита (Ag, Bi, Se и т. д.) [11]. Известно, что при пороговых дозах включаются компенсаторные механизмы (детоксикация, репарация), поэтому в качестве дозы сравнения нами была выбрана доза, превышающая пороговую в 10 раз (5000 мкг/кг).

На следующий день после окончания воздействия наночастиц 12 животных из каждой группы были выведены из эксперимента (ранний период исследования), остальные животные — через 6 мес (отдалённый период исследования).

**Общий протокол пробоподготовки органов (почки, печень).** После декапитации у каждого животного извлекали почки, печень и семенники, которые фиксировали в нейтральном буферном растворе формалина (10%), обезживали этанолом восходящей концентрации (от 70 до 100%) и помещали в гомогенизированную парафиную среду для гистологических исследований HistoMix (BioVitrum, Россия). Далее приготовленные с помощью микротомы MC-1 серийные фронтальные срезы органов (4–5 мкм) окрашивали на обычных гистологических предметных стеклах гематоксилином и эозином для обзорной микроскопии с разрешением  $\times 100$  и  $\times 400$ .

Морфометрическое исследование проводили с помощью пакета прикладных программ Image Scope M. В образцах почек определяли толщину эндотелия проксимальных извитых канальцев и площадь капсулы Шумлянско-Боумана в корковом веществе органа, в печени оценивали балочнорadiaльное строение печёночных долек, подсчитывали число звездчатых макрофагов Купфера в синусоидных капиллярах и число полиядерных гепатоцитов.

**Определение концентрации гадолиния в органах методом масс-спектрометрии.** Сразу после извлечения органы тщательно высушивали в сухожаровом шкафу при температуре плюс 70 °C в течение трёх суток, а затем измельчали. После взятия навески пробы минерализовали в концентрированной азотной кислоте. Минерализацию осуществляли

Таблица 1 / Table 1

**Морфометрические показатели ткани печени животных групп GdAG500 и GdAG5000 в раннем и отдалённом постконтактном периодах исследования, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)****Morphometric indices of liver tissue in animals from the GdAG500 and GdAG5000 groups in the early and late post-contact observation period, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

| Показатель<br>Index                                                             | Ранний период исследования<br>The early period of research |                    |                      | Постконтактный период исследования<br>The post-contact period of research |                    |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|
|                                                                                 | Контроль<br>Control                                        | GdAG500<br>GdAG500 | GdAG5000<br>GdAG5000 | Контроль<br>Control                                                       | GdAG500<br>GdAG500 | GdAG5000<br>GdAG5000 |
| Число звездчатых макрофагов Купфера<br>Number of Kupffer's stellate macrophages | 7.9<br>(5.0–12.0)                                          | 8.4<br>(4.5–12.5)  | 8.2<br>(4.9–13.0)    | 8.9<br>(5.0–12.0)                                                         | 9.5<br>(5.5–12.2)  | 9.2<br>(4.5–12.5)    |
| Число полиядерных гепатоцитов<br>Number of polynuclear hepatocytes              | 7.0<br>(2.0–12.0)                                          | 7.8<br>(2.0–10.4)  | 8.1<br>(2.3–11.5)    | 7.2<br>(3.0–13.0)                                                         | 8.3<br>(2.4–11.4)  | 8.9<br>(4.3–15.5)    |

в автоклавах под контролем температуры в микроволновой системе Milestone ETHOS с автоклавами ротора высокого давления SKISET при температуре плюс 190 °C.

Концентрацию определяли методом количественной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500ce (Agilent Technologies, США) на базе лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН с использованием многоэлементного стандарта ICP-MS 68-A-A (High Purity Standards, США) и внутреннего стандарта индия. Данные представлены как концентрация металла в органах в каждой группе, выраженная в нг/г сухой органики.

**Математико-статистические методы исследования.** Статистический анализ результатов исследования проводили с использованием пакета прикладных программ SPSS Statistics 26 (IBM, США) применением *W*-критерия Шапиро – Уилка и *U*-критерия Манна – Уитни. Статистически значимые различия между группами подтверждались при достигнутом уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

**Результаты**

Гистологическое исследование печени в экспериментальных группах не выявило значительных отличий от образцов контрольной группы (рис. 1, см. на вклейке). Кровенаполнение синусоидальных капилляров, центральных вен и вен порталных трактов соответствовало норме. Портальные тракты не имели признаков расширения, склероза или воспаления. Структура печёночных долек, состоящая из балочно-радиальных элементов, осталась неизменной. Количество звездчатых макрофагов Купфера в синусоидальных капиллярах не отличалось от такового в контрольной группе. Количество полиядерных гепатоцитов не показало статистически значимых отличий от контрольной группы (табл. 1). В отдалённый постконтактный период также не было обнаружено каких-либо отличий от контрольной группы (см. табл. 1).

Кровоснабжение коркового и мозгового веществ почек было в пределах нормы, нарушения реологических свойств крови в органе отсутствовали. Состояние стенок почечных артерий и артериол также соответствовало норме. Интерстициальная ткань нарушений не имела. Структура почечных клубочков была сохранена. Очаги воспаления или некроза в корковом и мозговом веществе почечной ткани отсутствовали. Эпителий дистальных и проксимальных почечных канальцев не имел отклонений от нормы. В корковом веществе почки сразу после окончания воздействия в дозе 500 мкг/кг отмечается статистически значимое увеличение площади капсулы Шумлянского – Боумена по сравнению с контрольной группой ( $p = 0,0001$ ), в отдалённом постконтактном периоде площадь камеры ещё больше увеличивается (табл. 2; рис. 2, см. на вклейке). Установлено, что при воздействии нанокompозита гадолиния в дозе 5000 мкг/кг площадь камеры Шумлянского – Боумена снижается по сравнению с контрольными значениями ( $p = 0,01$ ), однако в отдалённом постконтактном периоде данный показатель приходит в норму и не отличается от контрольных значений (см. табл. 2; см. рис. 2 на вклейке). Согласно Г.Г. Автандилову [12], показатели площади камеры Шумлянского – Боумена могут изменяться в пределах 30%. В нашем случае все изменения площади камеры укладываются в рамки физиологической нормы для данной структуры. Толщина эндотелия проксимальных извитых канальцев коркового вещества почки во всех группах животных не отличалась от показателей контрольной группы, в отдалённом постконтактном периоде данный показатель также не имел отличий от контрольных значений (табл. 3; см. рис. 2 на вклейке).

Результаты определения концентрации гадолиния во внутренних органах животных при различных дозах введения представлены в табл. 4.

Согласно результатам проведённых исследований, внутрижелудочное введение нанокompозита гадолиния в дозах 500 и 5000 мкг/кг вызывает статистически значимое повы-

Таблица 2 / Table 2

**Морфометрические показатели изменения площади капсулы Шумлянского – Боумена в корковом веществе почек белых крыс при подостром воздействии GdAG500 и GdAG5000 в динамике исследования, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)****Morphometric indices of changes in the area of the Shumlyansky – Bowman capsule in the renal cortex in white rats under subacute exposure to GdAG500 and GdAG5000 in the course of the examination, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

| Период исследования<br>Survey period  | Воздействие GdAG500   Impact of GdAG500 |                                 | Воздействие GdAG5000   Impact of GdAG5000 |                                 |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
|                                       | GdAG500   GdAG500                       | Контроль   Control              | GdAG5000   GdAG5000                       | Контроль   Control              |
| Ранний период<br>Early period         | 22341.14<br>(21216.47–30131.14)*        | 19970.59<br>(10690.82–26808.56) | 16266.47*<br>(14116.53–19067.2)           | 19006.04<br>(15047.52–21788.14) |
| Отдалённый период<br>Long-term period | 30248.94<br>(26576.96–34256.77)*        | 25378.83<br>(23426.41–28998.59) | 21216.48<br>(19722.29–25721.13)           | 20461.9<br>(19300.19–23958.27)  |

Примечание. \* – различия статистически значимы по сравнению с контролем по критерию Манна – Уитни,  $p < 0,05$ .

Note: \* – the differences are statistically significant compared to the control according to the Mann – Whitney test,  $p < 0.05$ .

Таблица 3 / Table 3

**Морфометрические показатели толщины эпителия проксимальных извитых канальцев в корковом веществе почек белых крыс при подостром воздействии Gd-AG в дозе 500 и 5000 мкг/кг в динамике исследования, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

**Morphometric indices of the epithelial thickness of the proximal convoluted tubules in the renal cortex of white rats under subacute exposure to Gd-AG at a dose of 500 and 5000 µg/kg in the course of the examination, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

| Период исследования<br>Survey period | GdAG500<br>GdAG500 | Контроль<br>Control | GdAG5000<br>GdAG5000 | Контроль<br>Control |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Ранний период   Early period         | 11.5 (10.4–12.9)   | 11.3 (10.3–12.3)    | 11.4 (11.5–11.9)     | 11.1 (10.8–12.2)    |
| Отдалённый период   Long-term period | 11.35 (10.0–12.4)  | 11.6 (11.1–12.2)    | 9.7 (9.7–10.1)       | 10.4 (10.2–10.5)    |

Таблица 4 / Table 4

**Концентрация гадолиния в образцах печени и почек животных при введении GdAG500 и GdAG5000 в динамике исследования, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

**Gadolinium concentration in animal liver and kidney samples after administration of GdAG500 and GdAG5000 in the dynamics of the examination, Me (Q<sub>25</sub>–Q<sub>75</sub>)**

| Период исследования<br>Survey period | Печень   Liver       |                      | Почки   Kidney       |                      |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                      | GdAG500<br>GdAG500   | GdAG5000<br>GdAG5000 | GdAG500<br>GdAG500   | GdAG5000<br>GdAG5000 |
| Ранний период   Early period         | 17.93 (15.45–44.97)* | 27.39 (18.18–36.71)* | 25.64 (20.27–31.23)* | 34.1 (29.02–44.29)*  |
| Отдалённый период   Long-term period | 1.69 (1.53–1.86)*    | 3.63 (2.98–3.96)*    | 3.22 (3.19–3.67)*    | 6.73 (6.13–7.37)*    |

Примечание. \* – различия с контролем статистически значимы по критерию Манна – Уитни,  $p \leq 0,05$ .

Note: \* – the differences compared to the control group are statistically significant according to the Mann – Whitney U test,  $p \leq 0.05$ .

шение концентрации металла в исследуемых органах, в том числе в более поздние сроки наблюдения. Зафиксированные изменения указывают на то, что гадолиний в форме нанокompозита с арабиногалактаном демонстрирует значительную степень бионакопления в изученных органах.

## Обсуждение

Редкоземельные металлы играют важную роль в современных технологиях, используются в лекарственных препаратах (лантан) и внутривенных контрастных веществах (гадолиний). Контрастные вещества на основе гадолиния представляют собой многодентатные органические лиганды, которые прочно связывают ион металла, в теории снижая его токсичность. Эти контрастные вещества выводятся преимущественно с мочой, однако их остаточных количеств достаточно для обнаружения концентраций гадолиния в органах (мозге, почках, печени и др.). К известным осложнениям введения контрастных веществ на основе гадолиния относятся повреждение почек, нефрогенный системный фиброз, кожные болезни и иногда необратимые неврологические последствия [13–15]. Так, ретроспективный анализ 68 пациентов с хронической болезнью почек показал, что у десяти пациентов (14,7%) повреждение почек развилось в течение 48 ч после эндоваскулярного введения содержащих гадолиний препаратов ProHance или Omniscan для установки почечного стента [16]. Обзор 19 клинических исследований показал, что острое повреждение почек после введения гадолиниевого контраста наблюдалось в 12–50% случаев [17]. Также выявлено, что контрастные вещества на основе гадолиния в дозах, используемых для ангиографии, более нефротоксичны, чем йодсодержащие [18]. Вышеуказанные факты неопровержимо свидетельствуют о токсичности гадолиний-содержащих препаратов, а также их опасности для здоровья и даже жизни пациентов. В связи с этим остро стоит вопрос о доступной и альтернативной замене гадолиний-содержащих препаратов, большие надежды связаны с использованием гадолиния в наноформе.

Важно отметить, что существует механизм образования наночастиц гадолиния из микрочастиц после внутривенного введения контрастного вещества для магнитно-резонансной томографии. Механизм подобной трансформации обусловлен выщелачиванием из фармацевтических лигандов и амальгамированием в шиповидные наночастицы [19]. На основании известных принципов токсичности наночастиц (чем больше отклонение частиц от сферической формы и больше удельный объём, тем токсичнее) можно сделать вывод о том, что шиповидные наночастицы, образующиеся из макрочастиц гадолиний-содержащих препаратов, также вносят вклад в развитие общей токсичности. В исследуемом нами композите частицы имели сферическую форму, что значительно снижало их токсичность. Это было подтверждено результатами эксперимента. Так, при воздействии нанокompозита в дозе 500 мкг/кг отмечалось незначительное увеличение площади камеры Шумлянського – Боумана, а при воздействии в дозе 5000 мкг/кг – снижение данного показателя. Эти изменения не носили патологического характера и лежали в пределах физиологической нормы для данной структуры, однако имели разнонаправленный характер, что косвенно указывает на возможный дозозависимый эффект при действии нанокompозита гадолиния на ткань почки. При этом структура остальных проксимальных и дистальных отделов нефрона (проксимальных и дистальных извитых канальцев) не имела изменений. Вместе с тем проведённое нами ранее *in vitro* исследование воздействия GdAG на культуру клеток фибробластов 3T3-SV 40 выявило цитотоксический эффект начиная с концентрации 0,02 mM (3,6 мкг/мл). Результаты показали, что GdAG оказывает дозозависимое цитотоксическое действие на клетки [20]. Высокую адаптационную способность печени и почек в контексте гомеостаза целостного организма можно обосновать функциями этих органов, так как печень является органом детоксикации и постоянно взаимодействует с токсическими агентами, поступающими в организм. Почки обладает аналогичным свойством, поскольку напрямую выводит продукты метаболизма токсиканта.

Также важно отметить, что в печени и почках содержание гадолиния кратно увеличивалось, что согласуется с выводами других исследователей о способности гадолиния накапливаться в различных органах, в том числе в печени [21], и нарушать их нормальную работу. В нашем случае гистологический анализ печени белых крыс не выявил каких-либо видимых изменений в структуре органа. Следовательно, накопление наночастиц гадолиния в печени никак не сказалось на его нормальном функционировании. Возможно, это связано с высокими адаптивными свойствами данного органа, а также сферической формой наночастиц, снижающей их потенциальную токсичность.

## Заключение

Таким образом, исследованные нами наночастицы гадолиния благодаря заданным физико-химическим характеристикам в отличие от макрочастиц и биотрансформируемых наночастиц шиповидной формы являются перспективными лечебно-диагностическими препаратами, значительно снижающими негативные эффекты для почек и печени. В дальнейшем это может быть использовано при создании диагностических препаратов нового поколения, спектр негативных эффектов для организма которых практически отсутствует, а также требует значительно меньшего количества вещества при проведении диагностики.

## Литература

(п.п. 1–8, 11, 13–19, 21 см. References)

9. Рукавишников В.С., Соседова Л.М., Вокина В.А., Титов Е.А., Новиков М.А., Якимова Н.Л. Оценка нейротоксичности нанометаллов, инкапсулированных на матрице арабиногалактан. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(10): 25–9. <https://elibrary.ru/ztuvhr>
10. Сухов Б.Г., Конькова Т.В., Титова Ю.Ю., Иванов А.В. Нанокоспозиты на основе гадолинийсодержащих соединений для диагностики, терапии и тераностики онкологических заболеваний головного мозга и способы их получения. Патент РФ № 2778928; 2022. <https://elibrary.ru/mfrnvh>
12. Автандилов Г.Г. *Морфометрия в патологии*. М.: Медицина; 1973.
20. Тютрина В.А., Андреева Е.С., Титов Е.А., Вокина В.А., Новиков М.А., Соседова Л.М. Исследование токсичности перспективного магнитно-резонансного контрастного агента на основе нанокоспозита арабиногалактана и гадолиния в экспериментах *in vivo* и *in vitro*. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2023; 175(5): 640–5. <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2023-175-5-640-645> <https://elibrary.ru/wwwgyy>

## References

1. Kermanizadeh A., Powell L.G., Stone V. A review of hepatic nanotoxicology – summation of recent findings and considerations for the next generation of study designs. *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.* 2020; 23(4): 137–76. <https://doi.org/10.1080/10937404.2020.1751756> <https://elibrary.ru/gqyicc>
2. Domingues C., Santos A., Alvarez-Lorenzo C., Concheiro A., Jarak I., Veiga F., et al. where is nano today and where is it headed? A review of nanomedicine and the dilemma of nanotoxicology. *ACS Nano*. 2022; 16(7): 9994–10041. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c00128> <https://elibrary.ru/vfsgbe>
3. Yang W., Wang L., Mettenbrink E.M., DeAngelis P.L., Wilhelm S. Nanoparticle toxicology. *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* 2021; 61: 269–89. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-032320-110338> <https://elibrary.ru/utwver>
4. Krug H.F., Nau K. Editorial: Methods and protocols in nanotoxicology. *Front. Toxicol.* 2022; 4: 1093765. <https://doi.org/10.3389/ftox.2022.1093765> <https://elibrary.ru/yfbmmw>
5. Johari S.A., Yu I.J., Valsami-Jones E. Editorial: Methods and protocols in nanotoxicology: volume II. *Front. Toxicol.* 2025; 6: 1532023. <https://doi.org/10.3389/ftox.2024.1532023> <https://elibrary.ru/tfipgi>
6. Ho S.L., Yue H., Tegafaw T., Ahmad M.Y., Liu S., Nam S.W., et al. Gadolinium Neutron Capture Therapy (GdNCT) agents from molecular to nano: current status and perspectives. *ACS Omega*. 2022; 7(3): 2533–53. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06603> <https://elibrary.ru/xhgwmu>
7. Siedek F., Muehe A.M., Theruvath A.J., Avedian R., Pribnow A., Spunt S.L., et al. Comparison of ferumoxylol- and gadolinium chelate-enhanced MRI for assessment of sarcomas in children and adolescents. *Eur. Radiol.* 2020; 30(3): 1790–803. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06569-y> <https://elibrary.ru/himstdk>
8. Nitta N., Takakusagi Y., Kokuryo D., Shibata S., Tomita A., Higashi T., et al. Intratumoral evaluation of 3D microvasculature and nanoparticle distribution using a gadolinium-dendron modified nano-liposomal contrast agent with magnetic resonance micro-imaging. *Nanomedicine*. 2018; 14(4): 1315–24. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2018.03.006>
9. Rukavishnikov V.S., Sosedova L.M., Vokina V.A., Titov E.A., Novikov M.A., Yakimova N.L. Assessment of neurotoxicity of nanometals encapsulated on arabinogalactan matrix. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2017; 57(10): 25–9. <https://elibrary.ru/ztuvhr> (in Russian)
10. Sukhov B.G., Konkova T.V., Titova Yu.Yu., Ivanov A.V. Nanocomposites based on gadolinium-containing compounds for the diagnosis, therapy, and theranostics of brain cancer and methods for their production. Patent RF No. 2778928; 2022. <https://elibrary.ru/mfrnvh> (in Russian)
11. Rukavishnikov V.S., Novikov M.A., Titov E.A., Sosedova L.M. Estimation of toxic properties of nanocomposites containing nanoparticles of bismuth, gadolinium, and silver. *Trace Elem. Electrolyt.* 2018; 35: 203–6. <https://doi.org/10.5414/TEX0155408> <https://elibrary.ru/yokibn>
12. Avtandilov G.G. *Morphometry in Pathology [Morfometriya v patologii]*. Moscow: Meditsina; 1973. (in Russian)
13. Ergun I., Keven K., Uruc I., Ekmekci Y., Canbakan B., Erden I., et al. The safety of gadolinium in patients with stage 3 and 4 renal failure. *Nephrol. Dial. Transpl.* 2006; 21(3): 697–700. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfi304> <https://elibrary.ru/ixqfah>
14. Briguori C., Colombo A., Airoldi F., Melzi G., Michev I., Carlino M., et al. Gadolinium-based contrast agents and nephrotoxicity in patients undergoing coronary artery procedures. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2006; 67(2): 175–80. <https://doi.org/10.1002/ccd.20592>
15. Elmstahl B., Leander P., Grant D., Doughty R.W., Chai C.M., Bjork J., et al. Histomorphological changes after renal X-ray arteriography using iodine and gadolinium contrast media in an ischemic porcine model. *Acta Radiol.* 2007; 48(10): 1109–19. <https://doi.org/10.1080/02841850701663442>
16. Takahashi E.A., Kallmes D.F., Mara K.C., Harmsen W.S., Misra S. Nephrotoxicity of gadolinium-based contrast in the setting of renal artery intervention: retrospective analysis with 10-year follow-up. *Diagn. Interv. Radiol.* 2018; 24(6): 378–84. <https://doi.org/10.5152/dir.2018.18172>
17. Martino F., Amici G., Rosner M., Ronco C., Novara G. Gadolinium-based contrast media nephrotoxicity in kidney impairment: the physiopathological conditions for the perfect murder. *J. Clin. Med.* 2021; 10(2): 271. <https://doi.org/10.3390/jcm10020271> <https://elibrary.ru/akirbh>
18. Rogosnitzky M., Branch S. Gadolinium-based contrast agent toxicity: a review of known and proposed mechanisms. *Biomaterials*. 2016; 29(3): 365–76. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9931-7> <https://elibrary.ru/ckqknq>
19. De Aguerro J., Howard T., Kusewitt D., Brearley A., Ali A.M., Degnan J.H., et al. The onset of rare earth metallosis begins with renal gadolinium-rich nanoparticles from magnetic resonance imaging contrast agent exposure. *Sci. Rep.* 2023; 13(1): 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28666-1> <https://elibrary.ru/sbgves>
20. Tyutrina V.A., Andreeva E.S., Vokina V.A., Titov E.A., Novikov M.A., Sosedova L.M. *In vivo* and *in vitro* analysis of toxicity of a prospective magnetic resonance contrast agent based on arabinogalactan and gadolinium nanocomposite. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2023; 17(5): 695–9. <https://doi.org/10.1007/s10517-023-05928-6> <https://elibrary.ru/qjftao>
21. Korolenko T.A., Dergunova M.A., Alekseenko T.V., Zhanaeva S.Y., Filyushina E.E., Filatova T.G. Intralysosomal accumulation of gadolinium and lysosomal damage during selective depression of liver macrophages *in vivo*. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2006; 142(4): 391–4. <https://doi.org/10.1007/s10517-006-0373-z> <https://elibrary.ru/ljpldf>

## Сведения об авторах

**Новиков Михаил Александрович**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: novik-imt@mail.ru

**Титов Евгений Алексеевич**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: g57097@yandex.ru

**Панкова Анна Александровна**, мл. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: nyuta.pankova.96@mail.ru

*Лисецкая Людмила Гавриловна*, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: lis\_lu154@mail.ru

*Соседова Лариса Михайловна*, доктор мед. наук, профессор, зав. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: sosedlar@mail.ru

### About the authors

*Mikhail A. Novikov*, PhD (Medicine), senior researcher, Laboratory of Biomodeling and Translational Medicine, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6100-6292> E-mail: novik-imt@mail.ru

*Evgeny A. Titov*, PhD (Medicine), senior researcher, Laboratory of Biomodeling and Translational Medicine, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, 665826, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0665-8060> E-mail: g57097@yandex.ru

*Anna A. Pankova*, junior researcher, Laboratory of Biomodeling and Translational Medicine, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6012-0173> E-mail: nyuta.pankova.96@mail.ru.

*Lyudmila G. Lisetskaya*, PhD (Biology), researcher, Laboratory of Analytical Ecotoxicology and Biomonitoring, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0876-2304> E-mail: lis\_lu154@mail.ru

*Larisa M. Sosedova*, DSc (Medicine), professor, head, Laboratory of Biomodeling and Translational Medicine, East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1052-4601> E-mail: sosedlar@mail.ru



Ефимова Н.В., Мыльникова И.В., Богданова О.Г.

## Коэффициент полового диморфизма длины тела взрослых как критерий социально-экологического благополучия

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** С учётом зависимости полового диморфизма от влияния социальных условий и экологического стресса представляется важным исследование изменений морфологического статуса в меняющихся условиях среды обитания.

**Цель** — изучить динамику стрессового влияния комплекса факторов на основе оценки полового диморфизма роста взрослого населения.

**Материалы и методы.** Использованы деперсонифицированные данные: длина тела взрослых лиц 1958–1961 годов рождения (1-е поколение: 410 мужчин и 625 женщин), 1979–1989 годов рождения (2-е поколение: 423 и 518 соответственно), 2000–2004 годов рождения (3-е поколение: 160 и 414 соответственно). Изменение средних показателей определено как разница величин последующего и предыдущего поколений. Оценка стрессового влияния дана по величине коэффициентов полового диморфизма, рассчитанных по формуле Н. М. Danzeiser.

**Результаты.** В 1-м поколении выявлено преобладание у мужчин роста 170–174 см (28,5%), у женщин — 160–164 см (34,4%). Во 2-м и 3-м поколениях у мужчин отмечены трёхмодальные ряды, где наибольшие частоты составили 21–29% (170–184 см). Вариационные ряды роста женщин данных поколений имели бимодальный вид (частоты 26,9–27,9% — рост 160–169 см). При сравнении средних величин роста 1-го и 2-го, 1-го и 3-го поколений как у мужчин, так и у женщин выявлены статистически значимые различия. Величина коэффициента полового диморфизма у мужчин и женщин свидетельствует об умеренном стрессе 2-го поколения, слабом стрессе в подгруппах с низким ростом 1-го и 3-го поколений, высоком стрессе у подгрупп с высоким ростом.

**Ограничения исследования.** Не изучен долевого вклад факторов среды обитания, образа жизни, генетических особенностей, этнической принадлежности у представителей различных социальных групп.

**Заключение.** Изменение роста в большей степени выражено в группах мужчин, коэффициенты полового диморфизма свидетельствуют о стрессовом влиянии комплекса факторов на соматический статус мужчин и женщин высокого роста.

**Ключевые слова:** рост; коэффициент полового диморфизма; поколения; стресс

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Для цитирования:** Ефимова Н.В., Мыльникова И.В., Богданова О.Г. Коэффициент полового диморфизма длины тела взрослых как критерий социально-экологического благополучия. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1055–1059. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1055-1059> <https://elibrary.ru/ncayfv>

**Для корреспонденции:** Ефимова Наталья Васильевна, e-mail: med\_eco\_lab@list.ru

**Вклад авторов:** Ефимова Н.В. — концепция и дизайн исследования, статистическая обработка, анализ, написание текста, редактирование; Мыльникова И.В. — обзор литературы, написание текста; Богданова О.Г. — сбор материала и статистическая обработка, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 06.03.2026 / Поступила после доработки: 16.04.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Natalya V. Efimova, Inna V. Mylnikova, Olga G. Bogdanova

## The coefficient of sexual dimorphism height in adults as a criterion of social and environmental well-being

East Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Changes in morphological status are important to study in changing environmental conditions due to the dependence of sexual dimorphism on the influence of stress factors.

**The aim to study** the course of the stressful impact of a complex of factors on a human population by assessing sexual dimorphism in the height in young adults.

**Materials and Methods:** Depersonalized height data for adults born in 1958–1961 (1<sup>st</sup> generation: 410 men and 625 women), 1979–1989 (2<sup>nd</sup> generation: 423 and 518 individuals), and 2000–2004 (3<sup>rd</sup> generation: 160 and 414 individuals) were used. The impact of stress was assessed using the sexual dimorphism coefficient.

**Results.** In the first generation, men with a height of 170–174 cm predominated, while women with a height of 160–164 cm. In the second and third generations, trimodal heights were observed in men, while bimodal heights were observed in women. When comparing the average heights of the first and second and first and third generations, statistically significant differences were revealed for both men and women. The sexual dimorphism coefficients indicate to moderate stress for the second-generation subpopulation; low stress in the short-stature subgroups of the first and third generations; and high stress for the tall-stature subgroups.

**Limitations.** The relative contribution of environmental factors, lifestyle, and genetic characteristics in representatives of the studied generations has not been studied.

**Conclusion.** Changes in height are more pronounced in male groups. The coefficients of sexual dimorphism indicate to the stress effect of a complex of factors on the somatic status of tall men and women.

**Keywords:** body height acceleration; sexual dimorphism coefficient; generations

**Compliance with ethical standards.** The study does not require a biomedical ethics committee opinion or other documents.

**For citation:** Efimova N.V., Mylnikova I.V., Bogdanova O.G. The coefficient of sexual dimorphism height of young adults as a criterion of social and environmental well-being. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(9): 1055–1059. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1055-1059> <https://elibrary.ru/ncayfv> (In Russ.)

**For correspondence:** Natalia V. Efimova, e-mail: med\_eco\_lab@list.ru

**Contribution:** Efimova N.V. — study concept and design, statistical processing and data analysis, writing, editing; Bogdanova O.G. — data collection and statistical processing, writing; Mylnikova I.V. — literature review, writing the text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: March 3, 2026 / Revised: April 16, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Т.И. Алексеева в концепции формирования и закрепления в поколениях на генетическом уровне адаптивных особенностей, соответствующих среде обитания, обосновала различия влияния факторов среды обитания, в том числе социальных и экономических условий, на размеры тела в зависимости от пола [1]. Некоторые авторы оценивали эти различия как результат эволюционного [2, 3] и адаптивного [4, 5] развития. Так, В.А. Геодакян сформулировал «экологическое правило дифференциации полов», согласно которому половой диморфизм как критерий эволюционной пластичности популяции растёт при ухудшении экологических условий, а в оптимальных условиях, напротив, снижается [5]. Однако оценивать выраженность половых различий антропометрических признаков можно лишь при достижении взрослого состояния, то есть практически при завершении ростовых процессов [6, 7].

Общий секулярный тренд проявляется в увеличении длины тела человека. По данным ВОЗ, в 1960-е годы средний рост мужчин в СССР составлял 168 см, женщин — 157 см, а в 2013 г. — 178 и 166 см соответственно, следовательно, за 50 лет рост и мужчин, и женщин увеличился примерно на 10 см [8]. Кросс-секционные и лонгитюдные исследования морфофизиологического статуса популяций, проживающих в различных климатогеографических условиях, многочисленны, но в основном они посвящены изучению антропометрических параметров в процессе роста и развития организма [9–14].

Работ, направленных на изучение антропометрических параметров взрослых лиц, относительно немного, в них рассматривались лишь отдельные регионы мира [15–18]. В Германии и странах Северной Европы восходящая тенденция роста замедляется (примерно на 2 см/десятилетие до середины XX века, в настоящее время — менее 1 см/десятилетие) [19]. Результаты недавних эпидемиологических исследований показали, что рост человека, возможно, приближается к верхнему пределу, за которым он не может увеличиваться даже при дальнейшем улучшении питания и здравоохранения.

**Цель работы** — изучить динамику стрессового влияния комплекса факторов на основе оценки полового диморфизма роста взрослого населения. Для достижения цели были решены следующие задачи: проведён сравнительный анализ роста одновозрастных выборок трёх когорт (условные старшее и среднее поколения XX века и младшее XXI), дана оценка стрессового влияния по величине коэффициентов полового диморфизма.

## Материалы и методы

Для изучения роста взрослого населения использованы деперсонифицированные данные проведённых ранее исследований с шагом 20 лет, включавших представителей мужского и женского пола 1958–1961 годов рождения (1-е поколение) и 1979–1982 годов рождения (2-е поколение), а также результаты собственных измерений роста взрослого населения 2000–2004 годов рождения (3-е поколение). Критерии включения: на момент исследования возраст 18–22 года, 1-я, 2-я группы здоровья; родились в срочных родах одноплодной беременности; место рождения — южные районы Иркутской области и Республики Бурятия; постоянное проживание в промышленных центрах указанных субъектов Российской Федерации. Всего в исследование вошли 993 мужчин и 1557 женщин, из них численность ( $n$ ): 1-го поколения — 410 и 625 человек соответственно; 2-го поколения — 423 и 518 человек; 3-го поколения — 160 и 414 человек. Измерение роста проводили в положении стоя с помощью ростомера с точностью 0,5 см в утренние часы.

Анализ данных выполнен с использованием программы Statistica 10. После оценки вариационных рядов на соответствие параметрическому закону распределения рассчитаны описательные характеристики: средняя арифметическая

( $M$ ); её 95%-й доверительный интервал (ДИ); стандартное отклонение (СО); мода ( $Mo$ ) и её частота в группе (%); минимальные и максимальные варианты с 95%-й вероятностью (2,5-й и 97,5-й процентиля соответственно); коэффициент вариации (КВ, %). Изменение средних показателей ( $\Delta$ ) определено как разница величин последующего и предыдущего поколений. Проверка гипотез о равенстве средних и дисперсий проведена с помощью критерия Левена (Lev-t), уровнем значимости считали  $p < 0,017$ . Половой диморфизм в группах разных поколений отражал коэффициент (КПД), рассчитанный по формуле (1):

$$\text{КПД (\%)} = R_m \cdot 100 / R_{ж}, \quad (1)$$

где  $R_m$  — длина тела в мужской группе;  $R_{ж}$  — длина тела в женской группе.

Величины КПД длины тела оценивались согласно Н.М. Danzeiser [20], полагая, что  $\text{КПД} \leq 106,8\%$  соответствует слабому стрессу,  $106,8 > \text{КПД} < 108\%$  — умеренному стрессу,  $108\%$  и более — сильному стрессу.

## Результаты

Характеристики мужских и женских групп в зависимости от поколения представлены в **табл. 1**.

Все представленные вариационные ряды малоизменчивы, однако коэффициент вариации у мужчин несколько больше, чем у женщин (3,8–4,79% против 3,53–3,78% соответственно). Изменение роста между 1-м [175,8 ДИ (172,0–173,6) см] и 2-м [176,9 ДИ (176,3–177,6) см] поколениями мужчин составило 4,2 см, различия статистически значимы ( $p = 0,000$ ). При сравнении изучаемого параметра 1-го и 3-го [177,7 ДИ (176,5–178,5) см] поколений различия также значимы,  $\Delta = 4,75$  ( $p = 0,000$ ). Средние величины роста 2-го и 3-го поколений были близки,  $\Delta = 0,47$  ( $p = 0,218$ ). Наиболее часто в группе 1-го поколения встречался рост 170 см, во 2-м и 3-м поколениях  $Mo$  увеличилась до 180 см, но частота её составила 12,3 и 14,3% ( $p = 0,514$ ). Минимальная величина роста (2,5-й процентиль) последовательно в поколениях изменялась в пределах от плюс 7 см в паре «1–2-е поколения» до минус 5 см в паре «2–3-е поколения». Процентиль 97,5 во всех поколениях мужчин составил 190 см.

В группах женщин изменение роста между 1-м [161,7 ДИ (161,2–162,2) см] и 2-м [164,1 ДИ (163,8–164,8) см] поколениями составило 2,4 см, различия статистически значимы ( $p = 0,001$ ). При сравнении изучаемого параметра 1-го и 3-го [164,9 ДИ (164,2–165,5) см] поколений различия также значимы,  $\Delta = 3,2$  ( $p = 0,000$ ). Как и у мужчин, средние величины роста 2-го и 3-го поколений женщин не имели статистически значимых различий,  $\Delta = 0,8$  ( $p = 0,118$ ).

Наиболее часто в группе 1-го и 2-го поколений женщин встречался рост 160 см, частота 15,6 и 11,7% ( $p = 0,034$ ). В 3-м поколении наиболее часто встречался рост 165 см; 2,5-й процентиль роста у женщин колебался в пределах 1–3 см, а 97,5-й был стабилен — 175 см.

Интервальная оценка преобладающих частот роста свидетельствует, что в 1-м поколении и у мужчин, и у женщин наблюдалось преобладание одной частоты. Так, у мужчин рост от 170 до 174 см отмечен в 28,5% случаев, тогда как смежные интервалы 165–169 и 175–179 см составили лишь 15–16%. У женщин чаще был зарегистрирован рост 160–164 см (34,4%), а в интервалах 155–159 и 165–169 см — в 21–22%. В последующих поколениях выявлены изменения: сдвиг частот в сторону увеличения модальности вариационных рядов (см. **рисунк**). Во 2-м и 3-м поколениях мужчин отмечены трёхмодальные ряды, где наибольшие частоты составляют 21–29%. Вариационные ряды роста женщин данных поколений имели бимодальный вид (частоты 26,9–27,9%).

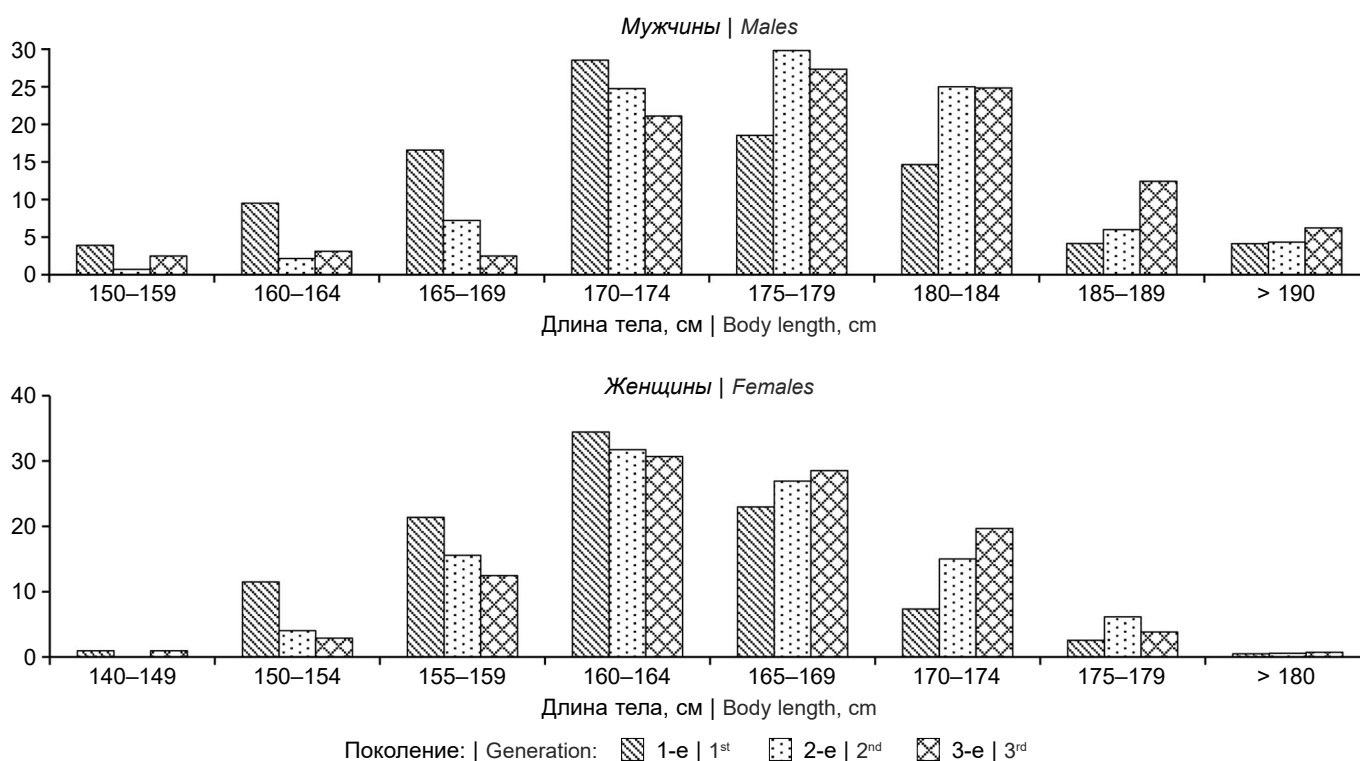
КПД роста в поколениях отражал изменение суммарного воздействия среды обитания. Средние величины роста во 2-м поколении можно оценивать как умеренный стресс

Таблица 1 / Table 1

## Характеристики мужских и женских групп в зависимости от пола и поколения

Average characteristics of male and female groups depending on gender and generation

| Характеристика<br>Characteristic             | Поколения мужчин   Generations of men |                                  |                                  | Поколения женщин   Generations of women |                                  |                                  |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                                              | 1-е   1 <sup>st</sup><br>n = 410      | 2-е   2 <sup>nd</sup><br>n = 423 | 3-е   3 <sup>rd</sup><br>n = 160 | 1-е   1 <sup>st</sup><br>n = 627        | 2-е   2 <sup>nd</sup><br>n = 510 | 3-е   3 <sup>rd</sup><br>n = 417 |
| M, см   Mean, cm                             | 175.8                                 | 176.9                            | 177.7                            | 161.7                                   | 164.1                            | 164.9                            |
| ДИ, см   CI, cm                              | 172.0–173.6                           | 176.3–177.6                      | 176.5–178.5                      | 161.2–162.2                             | 163.8–164.8                      | 164.2–165.5                      |
| СО, см   Standart deviation, cm              | 8.28                                  | 6.71                             | 7.57                             | 6.10                                    | 5.99                             | 6.0                              |
| Mo, см   Moda, cm                            | 170.0                                 | 180.0                            | 180.0                            | 160                                     | 160                              | 165                              |
| Частота моды, %   Mode frequency, %          | 17.3                                  | 12.3                             | 14.4                             | 15.6                                    | 11.7                             | 10.5                             |
| P <sub>2,5</sub> , см   2.5 percentile, cm   | 157.0                                 | 164.0                            | 159.0                            | 150.0                                   | 152.0                            | 153.0                            |
| P <sub>97,5</sub> , см   97.5 percentile, cm | 190.0                                 | 190.0                            | 190.0                            | 175.0                                   | 175.0                            | 175.0                            |
| KB, %   Variation coefficient, %             | 4.79                                  | 3.8                              | 4.26                             | 3.78                                    | 3.64                             | 3.53                             |



Частота роста у мужчин и женщин в 1-м, 2-м и 3-м поколениях.

Height frequency in males and females in the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, and 3<sup>rd</sup> generations.

Таблица 2 / Table 2

## Коэффициенты полового диморфизма длины тела в трёх поколениях, рассчитанные по среднегрупповым параметрам

Coefficients of sexual dimorphism of height in three generations, calculated using average group parameters

| Поколение<br>Generation | Средняя по всей группе<br>Average for the whole group | Подгруппы<br>Subgroups                |                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                         |                                                       | низкий рост (Q1)<br>short height (Q1) | высокий рост (Q4)<br>high height (Q4) |
| 1-е   1 <sup>st</sup>   | 106.9                                                 | 105.7                                 | 108.4                                 |
| 2-е   2 <sup>nd</sup>   | 107.7                                                 | 107.5                                 | 107.7                                 |
| 3-е   3 <sup>rd</sup>   | 107.7                                                 | 106.7                                 | 108.1                                 |

(табл. 2). Разнонаправленные изменения КПД выявлены в подгруппах лиц с низким и высоким ростом в 1-м и 3-м поколениях. Так, диморфизм между мужчинами и женщинами с низким ростом (величины вошли в первый квартиль вариационного ряда) выражен слабо (105,5 – в 1-м поколении и 106,7 – в 3-м). В те же периоды в группе с высоким ростом наблюдался высокий стресс (108,4 и 108,1).

## Обсуждение

Активность процессов акселерации, проявляющаяся прежде всего увеличением роста, подробно описана в отечественной [4, 10, 14] и зарубежной [21, 22] литературе. Аналогичные результаты получены нами при компаративной оценке роста представителей поколений, родившихся в 1958–1962 и в 1979–1982 гг. При сравнении отмечено увеличение всех статистических характеристик. Так, у мужчин средняя величина роста увеличилась за первый период на 1,1 см,

мода — на 10 см, рост в подгруппе Q1 — на 7 см; во второй — на 0,8 и 0 см. Вместе с тем минимальное значение роста в группе обследованных снизилось на 5 см. В группе женщин акселерация выражена слабее: средняя величина возросла на 2,4 см в первый период и 0,8 см — во второй; мода — на 0 и 5 см соответственно, минимальный рост — на 2 и 1 см. Как указывают German A. и Hochberg Z., базируясь на результатах собственных исследований и антропологических данных, подтверждается гипотеза женской устойчивости: вне зависимости от изменения среды вариативность показателей роста у женщин меньше, чем у мужчин [23]. Половой диморфизм в размерах тела более выражен, когда уровень жизни высок, а состояние здоровья положительно коррелирует с соотношением роста мужчин и женщин. При этом меньший рост мужчин в периоды экологического стресса приводил к меньшему половому диморфизму в размерах тела [5, 23].

Проведённая нами интегральная оценка выраженности влияния комплекса факторов во все рассматриваемые периоды по уровню полового диморфизма свидетельствует об умеренном среднegrupповом стрессе (КПД < 106,8). По мнению ряда авторов, интенсификация антропогенного стресса до определённого порога оказывает акцелерирующий эффект на соматический статус развивающегося организма, проявляющийся преимущественно у лиц мужского пола к 17-летнему возрасту, в отличие от ровесниц, что проявляется увеличением КПД [24–27]. Однако, как показали А.К. Горбачева и Т.К. Федотова, при дальнейшем росте антропогенной нагрузки воздействие переходит в дистресс. При этом выявляется децелерирующий эффект, в первую очередь у юношей, и снижение КПД [27].

Интересно рассмотреть изменение КПД в подгруппах, вошедших в крайние кватерти по росту (I и IV). В подгруппе I кватерти у мужчин средний рост составил 162,8 см в 1-м поколении, 168,6 см — во 2-м, 168,2 см — в 3-м, то есть на 5,4 см в целом за 60 лет. По поколениям у женщин отмечено увеличение со 154 см в среднем в 1-м поколении до 156,8 см во 2-м и до 157,7 см — в 3-м, то есть на 3,7 см.

В IV кватерти суммарный прирост выражен в меньшей степени: у мужчин — на 2,6 см (183,6 см — в 1-м поколении, 185,4 и 186,2 см — во 2-м и 3-м поколениях); у женщин — на 3 см (169,3; 172,1 и 172,3 см соответственно). Если в I кватерти (для лиц с низким ростом) КПД свидетельствовал о слабом стрессе в 1-м и 3-м поколениях и умеренном во 2-м, то для лиц с высоким ростом (IV кватерти) характерен высокий стресс. Такие оценки не противоречат данным о сниженных адаптивных возможностях высоко-ро-слых людей, их большей заболеваемости.

**Ограничения полученных результатов**, имеющих пилотный характер, связаны с оценкой коэффициента полового диморфизма как критерия общего стрессового воздействия. В работе не рассмотрены долевые вклады отдельных факторов среды обитания, образа жизни, генетических особенностей в формирование различий роста у лиц мужского и женского пола. Кроме того, мы не учитывали этнический состав контингента и включили в выборочные группы только городское население. Для снижения неопределённости оценок на следующем этапе планируется провести анализ приоритетных факторов, влиявших на организм в процессе роста и развития представителей 3-го поколения.

## Заключение

Таким образом, соотношение роста мужчин и женщин можно рассматривать как индикатор комплексного влияния средовых, генетических и половых характеристик. В поколении родившихся в 1958–1961 гг. XX века преобладал рост 170–174 см у мужчин (зарегистрирован у 28,5% обследованных), 160–164 см у женщин (34,3%). В последующих поколениях вариативность роста увеличилась, причём у мужчин больше, чем у женщин: во 2-м и 3-м поколениях мужчин отмечены трёхмодальные ряды, у женщин — бимодальные. Половой диморфизм размеров тела более выражен в тех группах обследованных с высоким ростом, где коэффициент полового диморфизма в 1-м и 3-м поколениях был > 108, что свидетельствует о сильном стрессе.

## Литература

(п.п. 5, 11–13, 17, 19–25 см. References)

1. Алексеева Т.И. *Адаптация человека в различных экологических нишах Земли (биологические аспекты): курс лекций*. М.: Изд-во МНЭПУ; 1998. 280 с.
2. Дорохов Р.Н., Губа В.П. Интегративная антропология о соматическом и физическом развитии детей и подростков. *Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал*. 1999; 2(3): 165–7.
3. Геодакян В.А. Эволюционная теория пола. *Природа*. 1991; (8): 60–9.
4. Година Е.З. Половой диморфизм и высокогорный стресс. В кн.: *Женщина в аспекте физической антропологии*. М.; 1994: 135–43.
6. Никитюк Б.А. Факторы роста и морфофункционального созревания организма. М.: Наука; 1978. 147 с.
7. Саливон И.И., Полина Н.И., Марфина О.В., Гурбо Т.Л. *Физическое развитие детей Беларуси в XX–XXI вв.* Минск: Беларуская навука; 2023. 465 с.
8. Спицына Н.Х., Балинова Н.В. Динамика формирования физического развития и репродуктивной структуры калмыков. *Сибирские исторические исследования*. 2021; (3): 129–39. <https://doi.org/10.17223/2312461X/33/6> <https://elibrary.ru/tstwxh>
9. Сердюковская Г.Н. Оценка физического развития детей и подростков. Информативность и возможности метода. *Гигиена и санитария*. 1981; (12): 15–8.
10. Ямпольская Ю.А., Скоблина Н.А., Бокарева Н.А. Лонгитудинальные исследования показателей физического развития школьников г. Москвы (1960–е, 1980–е, 2000–е гг.). *Вестник антропологии*. 2011; (20): 63–70.
14. Кучма В.Р., Скоблина Н.А., Милушкина О.Ю., Гудинова Ж.В., Бокарева Н.А., Гаврюшин М.Ю. и др. *Физическое развитие детей и подростков Российской Федерации. Выпуск VII: учебное пособие*. М.: Литтерра; 2019. 176 с.
15. Грушевский В.А. Физиологические аспекты физического здоровья и улучшения параметров двигательной активности у студентов вуза. *Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования*. 2024; (4): 158–61.
16. Тартаковский Д.В. Влияние физического развития на адаптацию студентов-первокурсников в университете. *Постулат*. 2024; (1): 66.
18. Скриган Г.В., Гурбо Т.Л. Основные показатели физического развития в двух последовательных поколениях современных белорусов (родители — дети). *Актуальные вопросы антропологии*. 2025; 20: 369–78.
26. Калужный Е.А., Рахманов Р.С., Богомолова Е.С., Мухина И.В., Курникина А.А., Горбачева А.К. и др. Сравнительная оценка физического развития детей и подростков, проживающих на различных по уровню антропогенной нагрузки территориях. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНУСО*. 2023; 31(3): 34–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-3-34-42> <https://elibrary.ru/kmkaet>
27. Горбачева А.К., Федотова Т.К. К методике урбоэкологических исследований: изменчивость полового соматического диморфизма в юношеском возрасте по вектору урбанизации. *Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология*. 2025; 23(2): 17–25. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-25-2-2> <https://elibrary.ru/qaxhul>

## References

1. Alekseeva T.I. *Human adaptation in various ecological niches of the Earth (biological aspects): lecture course [Adaptatsiya cheloveka v razlichnykh ekologicheskikh nishakh Zemli (biologicheskie aspekty): kurs lektii]*. Moscow: MNEPU Publishing House; 1998. 280 p. (in Russian)
2. Dorokhov R.N., Guba V.P. Integrative anthropology of somatic and physical development of children and adolescents. *Matematicheskaya morfologiya: elektronnyi matematicheskii i mediko-biologicheskii zhurnal*. 1999; 2(3): 165–7. (in Russian)
3. Geodakyan V.A. Evolutionary theory of sex. *Priroda*. 1991; (8): 60–9. (in Russian)
4. Godina E.Z. Sexual dimorphism and high-altitude stress. In: *Woman in the Context of Physical Anthropology [Zhenshchina v aspekte fizicheskoi antropologii]*. Moscow; 1994: 135–43. (in Russian)
5. German A., Hochberg Z. Sexual dimorphism of size ontogeny and life history. *Front. Pediatr.* 2020; 8: 387. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.00387> <https://elibrary.ru/lqprlg>

## Original article

6. Nikityuk B.A. *Factors of growth and morphofunctional maturation of the organism [Faktyory rosta i morfofunktsional'nogo sozrevaniya organizma]*. Moscow: Nauka; 1978. 147 p. (in Russian)
7. Salivon I.I., Polina N.I., Marfina O.V., Gurbo T.L. *Physical development of children in Belarus in the XX–XXI centuries [Fizicheskoe razvitiye detei Belarusi v XX–XXI vv.]*. Minsk: Belaruskaya navuka; 2023. 465 p. (in Russian)
8. Spitsyna N.Kh., Balinova N.V. Dynamics of the formation of physical development and reproductive structure of Kalmyks. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya*. 2021; (3): 129–39. <https://doi.org/10.17223/2312461X/33/6> <https://elibrary.ru/tstwxv> (in Russian)
9. Serdyukovskaya G.N. Assessment of physical development of children and adolescents. Information content and capabilities of the method. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 1981; (12): 15–8. (in Russian)
10. Yampolskaya Yu.A., Skoblina N.A., Bokareva N.A. Longitudinal studies of indicators of physical development of Moscow schoolchildren (1960s, 1980s, 2000s). *Vestnik antropologii*. 2011; (20): 63–70. (in Russian)
11. Nakatsuka H., Ohashi M., Watanabe T., Ikeda M. Small, yet steady secular gain in height and weight of school children in the city of Sendai in past 15 years. *Tohoku J. Exp. Med.* 1988; 156(4): 341–50. <https://doi.org/10.1620/tjem.156.341>
12. Henneberg M., Brush G., Harrison G.A. Growth of specific muscle strength between 6 and 18 years in contrasting socioeconomic conditions. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2001; 115(1): 62–70. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1057> <https://elibrary.ru/grrenj>
13. Begić A., Halilović J.H., Mešalić L., Halilović S.H. Secular trend of anthropometric parameters of newborns in municipalities of Tuzla Canton (1976–2007). *Med. Glas. (Zenica)*. 2016; 13(2): 125–35. <https://doi.org/10.17392/851-16> <https://elibrary.ru/xtqakb>
14. Kuchma V.R., Skoblina N.A., Milushkina O.Yu., Gudinova Zh.V., Bokareva N.A., Gavryushin M.Yu., et al. *Physical development of children and adolescents of the Russian Federation. Issue VII: textbook [Fizicheskoe razvitiye detei i podrostkov Rossiiskoi Federatsii. Vypusk VII: uchebnoe posobie]*. Moscow: Litterra; 2019. 176 p. (in Russian)
15. Gruzhevsky V.A. Physiological aspects of physical health and improvement of motor activity parameters in female university students. *Meditsina. Sotsiologiya. Filosofiya. Prikladnye issledovaniya*. 2024; (4): 158–61. (in Russian)
16. Tartakovsky D.V. The influence of physical development on the adaptation of first-year students at the university. *Postulat*. 2024; (1): 66. (in Russian)
17. NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). A century of trends in adult human height. *Elife*. 2016; 5: e13410. <https://doi.org/10.7554/eLife.13410> <https://elibrary.ru/wvecdr>
18. Skrigan G.V., Gurbo T.L. Main indicators of physical development in two consecutive generations of modern Belarusians (parents – children). *Aktual'nye voprosy antropologii*. 2025; 20: 369–78. (in Russian)
19. Gohlke B., Woelfle J. Growth and puberty in German children: is there still a positive secular trend? *Dtsch. Arztebl. Int.* 2009; 106(23): 377–82. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2009.0377>
20. Danzeiser H.M. A comparative analysis of sexual dimorphism and variability of stature in populations from around the world. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1992; Suppl. 14: 67–8.
21. Fudvoye J., Parent A.S. Secular trends in growth. *Ann. Endocrinol. (Paris)*. 2017; 78(2): 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.ando.2017.04.003>
22. Robić Pikel T., Malus T., Starc G., Golja P. Changes in the growth and development of adolescents in a country in socio-economic transition 1993–2013. *Zdr. Varst.* 2020; 59(3): 164–71. <https://doi.org/10.2478/sjph-2020-0021> <https://elibrary.ru/kfmmce>
23. Auld M.C. Global country-level estimates of associations between adult height and the distribution of income. *Am. J. Hum. Biol.* 2018; 30(6): e23138. <https://doi.org/10.1002/ajhb.23152> <https://elibrary.ru/xbikqi>
24. Morrow E.H. The evolution of sex differences in disease. *Biol. Sex Differ.* 2015; 6: 5. <https://doi.org/10.1186/s13293-015-0023-0> <https://elibrary.ru/ptnoyq>
25. Zajitschek S.R.K., Zajitschek F., Bonduriansky R., Brooks R.C., Cornwell W., Falster D.S., et al. Sexual dimorphism in trait variability and its eco-evolutionary and statistical implications. *Elife*. 2020; 9: e63170. <https://doi.org/10.7554/eLife.63170> <https://elibrary.ru/dqpsst>
26. Kalyuzhny E.A., Rakhmanov R.S., Bogomolova E.S., Mukhina I.V., Kurnikova A.A., Gorbacheva A.K., et al. Comparative assessment of physical development of children and adolescents living in territories with different levels of anthropogenic load. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2023; 31(3): 34–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-3-34-42> <https://elibrary.ru/kmkaet> (in Russian)
27. Gorbacheva A.K., Fedotova T.K. On the methodology of urban ecological studies: variability of sexual somatic dimorphism in adolescence along the urbanization vector. *Lomonosov Journal of Anthropology*. 2025; 23(2): 17–25. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-25-2-2> <https://elibrary.ru/qaxhul> (in Russian)

## Сведения об авторах

**Ефимова Наталья Васильевна**, доктор мед. наук, профессор, вед. науч. сотр., ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: med\_eco\_lab@list.ru

**Мыльникова Инна Владимировна**, доктор мед. наук, доцент, ст. науч. сотр., ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

**Богданова Ольга Георгиевна**, доктор мед. наук, доцент, ст. науч. сотр., ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: olga.bogdanova2001@gmail.com

## About the authors

**Natalya V. Efimova**, DSc (Medicine), professor, leading researcher, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7218-2147> E-mail: med\_eco\_lab@list.ru

**Inna V. Mylnikova**, DSc (Medicine), associate professor, senior researcher, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0169-4513> E-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

**Olga G. Bogdanova**, DSc (Medicine), associate professor, senior researcher, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2358-2280> E-mail: olga.bogdanova2001@gmail.com

Читайте  
онлайн  
Read  
online

Егорова Н.А., Кочеткова М.Г., Рыжова И.Н.

## Значение природно-климатических факторов в социально-гигиеническом мониторинге. Часть 3: Солнечная активность и болезни системы кровообращения (нарративный обзор литературы)

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»  
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

### РЕЗЮМЕ

Солнце — основной источник энергии, света и тепла на Земле, без солнечной радиации не было бы условий, благоприятных для возникновения, развития и существования жизни. Но в настоящее время известно, что солнечная активность (СА) влияет на состояние организма и может служить фактором, ухудшающим течение уже имеющихся болезней системы кровообращения (БСК), поскольку сердечно-сосудистая система (ССС) является наиболее уязвимой к гелиогеомагнитным возмущениям. В то же время отмечается, что научных исследований для построения четкой системы связей между гелиогеофизическими явлениями и состоянием СССР по-прежнему недостаточно, и данные, полученные разными авторами, имеют несогласованности и противоречия.

Материалом исследования послужили методические документы по социально-гигиеническому мониторингу (СГМ) и научные публикации, в которых анализировались связи между БСК — ишемической болезнью сердца, артериальной гипертензией, сердечной недостаточностью, инфарктом миокарда, инсультами, нарушениями сердечного ритма — и такими показателями, как число Вольфа (W), индексы геомагнитной активности  $K_p$ ,  $A_p$  и DST, индекс F10.7, скорость солнечного ветра, количество солнечных пятен и вспышек.

Методы поиска литературы: по базам данных CyberLeninka и PubMed, выборочный, аналитико-синтетический, типологический.

**Заключение.** В современных условиях возрастает значение таких показателей СГМ, как СА и ГМА, критериев оценки и доказательств их влияния на СССР, поскольку эти данные позволяют принять меры профилактики сердечно-сосудистых осложнений (ССО), зависящих от СА и ГМА, путём предупреждения пациентов о неблагоприятном действии на них периодов высокой солнечной, космической и геомагнитной активности.

**Ключевые слова:** солнечная активность; геомагнитная активность; болезни системы кровообращения; обзор

**Для цитирования:** Егорова Н.А., Кочеткова М.Г., Рыжова И.Н. Значение природно-климатических факторов в социально-гигиеническом мониторинге. Часть 3: Солнечная активность и болезни системы кровообращения (нарративный обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1060–1066. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1060-1066> <https://elibrary.ru/olureo>

**Для корреспонденции:** Егорова Наталья Александровна, e-mail: NEgorova@cspfmba.ru

**Вклад авторов:** авторы внесли равный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, сбор и анализ материала, написание текста и редактирование. Все соавторы несут ответственность за целостность всех частей рукописи и утверждение её окончательной версии.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 23.06.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликовано: 20.10.2026

Natalija A. Egorova, Marina G. Kochetkova, Irina N. Ryzhova

## The importance of natural and climatic factors in social and hygienic monitoring. Solar activity and diseases of the circulatory system (narrative literature review, part 3)

Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation

### ABSTRACT

The Sun is the primary source of energy, light, and heat on planet Earth. Without solar radiation, conditions so favorable for the emergence, development, and existence of life on Earth would not exist. However, now solar activity (SA) is known to affect the body's health and can be a factor in worsening existing cardiovascular diseases, as the cardiovascular system (CVS) is particularly vulnerable to heliogeomagnetic disturbances. At the same time, research is noted to establish a clear system of relationships between heliogeophysical phenomena and the state of the CVS remains insufficient. Data obtained by different authors may contain inconsistencies and contradictions.

The material of the study was methodological documents on socio-hygienic monitoring (SHM) and scientific reports, considering the associations between coronary heart disease (CHD), arterial hypertension, heart failure, myocardial infarction, strokes, heart rhythm disturbances — and such indicators of heliogeomagnetic activity (HMA) as Wolf number (W), geomagnetic activity indices  $K_r$ ,  $A_r$  and DST, F10.7 index, solar wind speed, number of sunspots and flares.

Literature search methods: according to the CyberLeninka and PubMed databases, selective, analytical and typological.

**Conclusion.** In modern conditions, the importance of SGM indicators of SA and HMA as assessment criteria and evidence of their impact on CVS is increasing, since such data contribute to the adoption of measures for the prevention of CVDs dependent on SA and HMA by using heliogeomagnetic monitoring in the system of warning patients with CVD about the adverse effect of periods of high solar, space and geomagnetic activity on them.

**Keywords:** solar activity; geomagnetic activity; cardiovascular diseases; narrative literature review

**For citation:** Egorova N.A., Kochetkova M.G., Ryzhova I.N. The importance of natural and climatic factors in social and hygienic monitoring. Solar activity and diseases of the circulatory system (narrative literature review, part 3). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1060–1066. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1060-1066> <https://elibrary.ru/olureo> (In Russ.)

**For correspondence:** Nataliya A. Egorova, e-mail: NEgorova@cspfmz.ru

**Contribution:** the authors made equal contributions to the development of the concept and design of the study, collection and analysis of material, writing the text and editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: June 23, 2026 / Accepted: September 15, 2026 / Published: October 20, 2026

## Введение

Солнце — основной источник энергии, света и тепла на Земле, без солнечной радиации не было бы условий, благоприятных для возникновения, развития и существования жизни. Влияние Солнца формирует климат планеты и рассматривается как главная причина процессов его изменения. Такие природно-климатические факторы, как температура и влажность атмосферного воздуха, облачность, осадки, атмосферное давление, скорость ветра, практически полностью определяются энергией солнечной радиации<sup>1,2</sup> [1, 2]. Действие этих природно-климатических факторов на состояние здоровья человека, особенно на развитие сердечно-сосудистых осложнений (ССО) у людей, страдающих болезнями системы кровообращения, постоянно находится в поле зрения специалистов; выраженность соответствующих изменений сопоставляется с реальными значениями показателей как причиной ССО, а результаты позволяют судить о гигиенической значимости их включения в систему социально-гигиенического мониторинга (СГМ) [3–6]. Не меньшее внимание отечественных учёных привлекает и изучение влияния на здоровье гелиогеофизических факторов — солнечной активности и космической погоды, в том числе хромосферных вспышек, солнечных пятен, протуберанцев, коронарных выбросов массы, магнитных бурь, солнечного ветра<sup>3,4,5,6,7</sup> [7–10]. Глубокий интерес к проблеме связей между космическими факторами и болезнями человека возник благодаря трудам В.И. Вернадского о биосфере, способствовавшим лучшему пониманию того, как природа влияет на человека, а также работам основоположника гелиобиологии А.Л. Чижевского, который ещё в 20-х годах прошлого века установил связь между солнечной активностью (СА) и возникновением болезней [11–13]. В настоящее время хорошо известно, что космическая погода влияет на состояние организма и может служить фактором, ухудшающим течение уже имеющихся болезней, при этом сердечно-сосудистая система (ССС) является наиболее уязвимой к гелиогеомагнитным возмущениям. В то же время отмечается, что научных исследований для построения чёткой системы связей между гелиогеофизическими явлениями и показателями здоровья по-прежнему недостаточно, данные, полученные разными авторами, содержат противоречия, а специфика изменений в организме, в том числе в состоянии СССР, зависящих от состояния космической погоды, остаётся одной из наименее изученных сторон взаимодействия организма человека с «фотонной машиной» — Солнцем — и энергией космоса [7, 9, 14–18]. Это подчёркивает актуальность новых исследований и постоянного анализа полученных результатов для подтверждения оправданности включения солнечной активности в систему СГМ как одного из природно-климатических показателей.

## Мониторинг солнечной и геомагнитной активности

Согласно п. 4.3.2 Методических рекомендаций по проведению социально-гигиенического мониторинга<sup>8</sup>, система наблюдения за природно-климатическими факторами СГМ включает как один из показателей солнечную активность.

<sup>1</sup> БРЭ. Голицын Г.С., Зайцева Н.А. Атмосфера Земли. Доступно: <https://old.bigenc.ru/physics/text/1837660>

<sup>2</sup> БСЭ. Будько М.И., Кондратьев К.Я. Атмосфера Земли. Доступно: <https://niv.ru/doc/encyclopedia/bse/articles/1269/atmosfera-zemli.htm>

<sup>3</sup> Бреус Т.К. Влияние «космической погоды» на биологические объекты, включая человеческий организм. Гидрометцентр России: Вокруг Погоды. 2026. Доступно: <https://meteoinfo.ru/meteo-med/2916-meteo-med-breus>

<sup>4</sup> Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ. Доступно: <https://xras.ru>

<sup>5</sup> Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН. Доступно: <http://spaceweather.izmiran.ru>

<sup>6</sup> Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ. Доступно: <https://swx.sinp.msu.ru>

<sup>7</sup> Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН). Доступно: <https://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>

<sup>8</sup> Методические рекомендации № 2001/83. «Методические рекомендации по проведению социально-гигиенического мониторинга».

Однако в отличие от метеоусловий, для которых определён конкретный перечень контролируемых показателей<sup>9,10</sup>, каких-либо рекомендаций в отношении детализации информационных показателей солнечной активности в этих методических документах не приведено. Тем не менее наблюдения за активностью Солнца (и одновременно за геомагнитной активностью, не включённой в перечень природно-климатических факторов СГМ) в Российской Федерации постоянно проводят Лаборатория солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН (вспышки на Солнце, солнечный ветер, прогноз солнечного ветра, пятна на Солнце, магнитные бури онлайн, прогноз магнитных бурь)<sup>4</sup>, Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН (солнечные вспышки, параметры солнечного ветра, геомагнитная активность)<sup>5</sup>, Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ (данные, характеризующие уровень солнечной активности, геомагнитного и радиационного состояния магнитосферы и гелиосферы в режиме реального времени)<sup>6</sup>, Геофизический центр Российской академии наук (солнечные пятна, поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см при частоте 2800 МГц), солнечные вспышечные и протонные события, индексы геомагнитной активности DST, межпланетное магнитное поле<sup>7</sup>, Gismeteo.ru (геомагнитная активность (магнитные бури) для конкретных регионов страны). Значение сведений о солнечной и геомагнитной активности и космической погоде не ограничивается только их биомедицинскими последствиями и использованием для оценки и предупреждения рисков для здоровья населения<sup>11</sup>. Они имеют исключительную важность для прогнозирования и смягчения таких явлений, как нарушения работы спутниковых систем и радиосвязи, повышение радиационной опасности для пассажиров высотной авиации и космонавтов, повреждение солнечных батарей, выход спутников из строя, помехи в работе навигационных систем GPS (Global Positioning System), ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система/Galileo) и спутниковой навигации, возможность повреждения линий электропередачи, ускорение коррозии нефте- и газопроводов [19].

## Показатели солнечной и геомагнитной активности, используемые в научных работах для обнаружения связей здоровья человека с космической погодой

В научных работах, анализирующих действие активности Солнца и космической погоды на состояние здоровья людей, чаще всего используются следующие показатели: число Вольфа (W) — показатель солнечной активности, пропорциональный сумме всех наблюдаемых в этот день солнечных пятен и удесятёрённого числа образованных ими групп;  $K_p$  — максимальный суточный геомагнитный индекс, имеет уровни от 0 до 9 и характеризует силу магнитных бурь; индекс  $A_p$ , отражающий среднюю амплитуду вариаций геомагнитной активности на земном шаре за сутки; F 10,7 — поток радиоизлучения от Солнца на длине волны 10,7 см при частоте 2800 МГц; DST — индекс геомагнитной активности [9, 20–22]. Могут также использоваться показатели солнечной активности по количеству солнечных пятен, давлению и скорости потока плазмы, напряжённости геомагнитного поля и z-компоненты геомагнитного поля, потока протонов с энергией  $E > 100$  МэВ, показатели рекуррентности (REC) Vz-компоненты межпланетного магнитного поля [7, 21, 23].

<sup>9</sup> Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 17 ноября 2006 г. № 367 «О Порядке проведения социально-гигиенического мониторинга, представления данных и обмена ими».

<sup>10</sup> Методические рекомендации МР 2.1.10.0057–12. «Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска».

<sup>11</sup> Отраслевой план Роспотребнадзора от 03.12.2021 г. «Отраслевой план мероприятий первого этапа адаптации климата в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения на 2022 год».

## Солнечная активность и осложнения болезней системы кровообращения

Одной из наиболее дискутируемых в научной литературе проблем влияния активности Солнца на состояние организма человека является подтверждение существования причинно-следственных связей между динамикой параметров космической погоды и течением БСК. Основные аспекты наблюдений и сравнений сосредоточены на осложнениях ишемической болезни сердца (ИБС), артериальной гипертензии (АГ), остром инфаркте миокарда (ОИМ) и нарушениях мозгового кровообращения — ишемических и геморрагических инсультах (ИИ и ГИ). Исследования в этом направлении ведутся как в нашей стране, так и за рубежом.

В Сургуте в течение пяти лет оценивали связь между ухудшением течения ИБС (стенокардии) у 2327 больных и АГ у 1366 больных в возрасте 20–59 лет (по коэффициенту обращаемости) в зависимости от изменений КГМА — коэффициента геомагнитной активности, который рассчитывали по средней продолжительности магнитных бурь (МБ) в каждом месяце в днях, а также по среднемесячной интенсивности МБ в баллах. Частота развития нестабильной стенокардии имела достоверную прямую корреляционную связь с продолжительностью геомагнитных бурь ( $r = 0,65$ ;  $p = 0,025$ ). Артериальная гипертензия была достоверно связана как с продолжительностью ( $r = 0,706$ ;  $p = 0,012$ ), так и с интенсивностью ( $r = 0,677$ ;  $p = 0,017$ ) геомагнитной активности. Биопатогенное действие геомагнитных бурь (ГМБ) в отношении стенокардии определялось в большей степени их продолжительностью, в то время как для АГ имели значение и продолжительность, и интенсивность МБ [24].

В сходных, но более поздних исследованиях, выполненных в Сургуте, на основе данных 9385 выездных карт за пять лет изучали влияние колебаний геомагнитной активности (ГМА) на динамику вызовов скорой медицинской помощи (СМП) по поводу гипертонического криза (ГК) и ОКС. Выявлена достоверная прямая корреляционная связь между частотой проявления ОКС и среднемесячной продолжительностью МБ ( $r = 0,61$ ;  $p = 0,037$ ), а также между среднемесячной продолжительностью МБ и обращаемостью в СМП из-за развития ГК ( $r = 0,656$ ;  $p = 0,039$ ) [25].

В 2023–2024 гг. М.Д. Смирновой и соавт. (2025) было выполнено исследование с участием больных артериальной гипертензией (АГ), проживающих в Тюмени, Новосибирске и Сургуте (1374; 428 и 548 пациентов соответственно). Средние по интенсивности МБ ( $5 < K_p < 7$ ) не влияли на показатели артериального давления (АД) и частоту сердечных сокращений (ЧСС) больных, в то время как сильные МБ с  $K_p > 7$  вызвали статистически значимое изменение систолического артериального давления, причём наиболее отчетливое, на 1,2 мм рт. ст., за один день до МБ [17].

На территории Иркутска проанализированы данные (2006–2022 гг.) 157 920 ежедневных вызовов скорой медицинской помощи (СМП) по поводу ОИМ, острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК), внезапной сердечной смерти, нестабильной стенокардии в дни с различным количеством солнечных пятен и при их отсутствии. Были выявлены существенные различия количества вызовов к больным с БСК в дни, когда наблюдались пятна на Солнце, по сравнению с днями, в которые пятна отсутствовали ( $p < 0,001$ ). Независимо от возраста и пола пациентов медианное значение вызовов СМП за сутки было значимо выше в дни с максимальным количеством солнечных пятен по сравнению с днями минимума солнечной активности ( $p < 0,001$ ). При этом наибольшая частота ОНМК соответствовала наибольшему количеству солнечных пятен, увеличение её составляло 100%, преимущественно за счёт наиболее уязвимой группы мужчин старше 55 лет. Авторы сделали вывод о том, что солнечные пятна могут быть независимым предиктором острых форм болезней системы кровообращения [26, 27].

В исследованиях, проведённых в 2001–2004 и 2007–2010 гг. в Иркутске, использовали данные о 8942 выездах скорой

помощи к больным ИМ и 1953 выездах к пациентам с инфарктом мозга. Установлены связи между уровнями геомагнитной активности (ГМА) и частотой вызовов по диагнозам «инфаркт миокарда» и «инфаркт мозга». Установлено, что в период наблюдения частота развития инфарктов миокарда и инфарктов мозга имела достоверные положительные корреляционные связи с показателями ГМА: коэффициенты корреляции числа вызовов скорой помощи по поводу ИМ и инфаркта мозга с  $K_p$ -индексом были на уровне 0,21–0,35 ( $p < 0,05$ ) и 0,22–0,36 ( $p < 0,05$ ) соответственно. В то же время достоверных связей вызовов по диагнозу «острый инфаркт миокарда» и «инфаркт мозга» ни с числами Вольфа (W), ни с показателями потока радиоизлучения F 10,7 (частота 2800 МГц) выявлено не было [28].

При оценке 200 444 обращений населения за медицинской помощью в одном из районов Санкт-Петербурга (2006–2009 гг.) установлено, что наиболее значимыми показателями космической погоды, влияющими на заболеваемость ИБС, были давление и скорость потока плазмы, напряжённость геомагнитного поля и  $z$ -компоненты геомагнитного поля, поток протонов с энергией  $E > 100$  МэВ. Изменения космических параметров не менее чем на два дня опережали обращения за медицинской помощью по поводу ИБС, что давало возможность прогнозирования обращаемости за 2–5 дней до проявления осложнений ИБС [23].

Связь течения ОКС с гелиогеофизическими факторами изучали с участием 114 пациентов (мужчины и женщины, возраст  $60,7 \pm 9,1$  года), экстренно госпитализированных с осложнениями острого коронарного синдрома (ОКС) — ИМ, стабильной и нестабильной стенокардией. Осложнённому течению ОКС соответствовали достоверно более высокие значения  $A_p$  — индекса ГМА. Выявлена значимая корреляционная связь развития кардиоваскулярных осложнений у больных с ОКС с величинами  $K_p$ -индекса ( $\gamma = 0,3$ ;  $p = 0,008$ ) и  $A_p$ -индекса ( $\gamma = 0,27$ ;  $p = 0,003$ ). При больших величинах  $K_p$ - и  $A_p$ -индексов ГМА риск развития осложнений ОКС увеличивался соответственно в 1,62 и 1,15 раза [29].

Заболеваемость ИМ за 2007–2010 гг. (2110 случаев в одной из больниц Владикавказа) сопоставлена с данными о ГМА по индексу Dst (для МБ), числу солнечных пятен и показателем рекуррентности (REC) Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). В день МБ среднее количество ИМ значимо возрастало для пациентов и мужского, и женского пола. С применением метода кусочно-линейной регрессии получена модель, где при  $R = 0,647$  объяснённая дисперсия составила 41,88%, связывая, таким образом, 42% случаев ИМ с изменением количества солнечных пятен и определяя минимальную заболеваемость при количестве пятен 6–9 с увеличением при росте или уменьшении их числа. Найдена также средней силы обратная связь (–0,588) развития ИМ с показателем рекуррентности (REC) Vz-компоненты ММП. Авторы подчеркнули сложность взаимосвязей ИМ с космическими факторами и необходимость дальнейшей разработки адекватных методов их выявления [21].

Анализ корреляционных связей между изменениями солнечной и геомагнитной активности по двум гелиофизическим индексам (числа Вольфа W и  $K_p$ ) и течением БСК (ИМ, ИБС, стенокардия, аритмии, цереброваскулиты (ЦВ), АГ) проводили на основе данных обследования 2817 сотрудников 10 научно-исследовательских институтов Иркутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Наиболее высокий достоверный коэффициент корреляции найден для ЦВ с числами Вольфа W (0,93;  $p < 0,01$ ) и  $K_p$  (0,81;  $p < 0,05$ ), а также для аритмий — с числами Вольфа W (0,81;  $p < 0,05$ ). В целом для группы болезней системы кровообращения установлена достаточно высокая корреляционная связь с числами Вольфа W (0,68;  $p < 0,05$ ) и  $K_p$  (0,67;  $p < 0,05$ ). Авторы указывали на необходимость информирования участковых врачей о прогнозах солнечной и геомагнитной активности для снижения риска ухудшения течения болезней системы кровообращения. Очевидно,

«исследование природы влияния солнечной и геомагнитной активности на характер проявления различных форм патологии у человека является очередным принципиально важным в научном и практическом решении проблемы взаимосвязи явлений космической природы со здоровьем человека» [30].

В результате оценки влияния геомагнитной активности на состояние ССС при обследовании 74 пациентов с диагнозом АГ (средний возраст  $54,2 \pm 1,6$  года) выявлены корреляционные связи между утренними и вечерними значениями систолического и диастолического артериального давления, а также пульсовым и артериальным давлением с величиной  $K_p$ -индекса в момент измерения, накануне исследования, на следующий день и через 2–3 дня после измерения параметров сердечной деятельности. Коэффициенты корреляции мало отличались, во всех случаях были невысокими (на уровне 0,308–0,555), но оказались достоверными статистически ( $p < 0,001$ ). Время смещения ответа ССС организма пациентов относительно времени измерения  $K_p$ -индекса не было постоянным и в основном характеризовалось запаздыванием на два дня [31].

Проведён ретроспективный анализ развития геморагического инсульта (ГИ) у жителей Ростова-на-Дону в 2000–2010 гг. на основании данных 324 протоколов вскрытия. Методом наложения эпох выявлено, что в годы низкой солнечной активности число ГИ возрастало более чем в два раза. При высокой солнечной активности дебют ГИ совпадал с выраженным ростом вспышечной активности Солнца и на девять дней предшествовал её максимуму. Во время низкой солнечной активности дебют ГИ происходил на 3–4-й день интервала снижения солнечной активности, причём также после предшествующего роста вспышечной активности. Интенсивность вспышечной активности оценивали по критерию X-Ray класс C – общему количеству рентгеновских вспышек класса C в течение дня. Зависимость дебюта ГИ от интервала солнечного цикла была статистически значимой. Выявлено также, что в дни с высокой солнечной и геомагнитной (по  $K_p$ -индексу) активностью повышена вероятность развития ГИ в форме гематомы, тогда как при высокой вспышечной активности – в форме субарахноидального кровоизлияния [22].

В Пензенской области с применением метода наложения эпох при поиске связей случаев ИМ и инфаркта головного мозга (ИГМ) с солнечной и геомагнитной активностью (изучены данные стационарных карт 1869 пациентов) установлено, что число больных ИМ и ИГМ имело достоверную положительную корреляционную связь с СА по динамике чисел Вольфа ( $r = 0,273$ ;  $p < 0,05$ ), причём развитие ИМ отставало от всплесков СА на 24–72 ч. В то же время ИМ чаще развивались при максимальных величинах  $A_p$ -индексов ГМА ( $r = 0,186$ ;  $p < 0,01$ ). Рост заболеваемости острыми нарушениями мозгового кровообращения наблюдался в дни солнечных вспышек и в течение 1–3 дней после ГМБ. Авторы отмечали разнонаправленное влияние СА и МБ на развитие ИМ и ИГМ и указывали на целесообразность хрономедицинского мониторинга для своевременного информирования пациентов из групп риска коронарных и церебральных сосудистых катастроф о СА и ГМА для уменьшения негативных последствий солнечных вспышек и МБ [32].

Существует представление о некоторой несогласованности и даже противоречивости результатов исследований возможных связей факторов солнечной активности и космической погоды с осложнениями течения болезней системы кровообращения, интерес к новым исследованиям в этой области не снижается [7, 18, 32]. В 2023 г. Т.А. Зенченко и Т.К. Бреус опубликовали работу, в которой рассмотрели возможные причины нестабильности воспроизведения гелиобиологических результатов. Авторы сформулировали основные методологические принципы, создающие предпосылки для снижения доли необъяснимых и невоспроизводимых результатов изучения гелиобиологических эффектов:

1) необходимость учёта индивидуальных особенностей реагирования пациентов на космическую погоду, поскольку

используемое в медицинских исследованиях групповое усреднение результатов может в итоге маскировать её действие;

2) обязательность одновременного учёта сочетанного влияния на организм земной и космической погоды, поскольку возможен как синергизм, так и антагонизм их эффекта на состояние здоровья;

3) внимание к временному фактору, зависимости эффекта от фазы цикла солнечной и геомагнитной активности;

4) выбор оптимального масштаба регистрации изучаемой реакции биосистемы (минутного, суточного), поскольку из-за неоптимального масштаба дискретизации эффект может оказаться сглаженным (отсутствовать) или нестабильным;

5) учёт различий ответных реакций биосистем в разных масштабах времени, которые при ориентации на усреднённые значения могут также имитировать нестабильность действия [33].

Интересно отметить, что в 2014 г. была опубликована работа австралийских учёных V.L. Feigin и соавт., в которой при доказательстве существования связей между ГМА и риском развития инсультов фактически реализованы три принципа из пяти предложенных: учёт индивидуальных реакций пациентов на интенсивность ГМБ, стратификация данных анализа во времени, учёт возможного взаимодействия метеорологических факторов и ГМА.

На основании анализа случаев инсульта с информацией о 11 453 пациентах, собранной за 16 031 764 человеко-года наблюдения в Новой Зеландии, Австралии, Соединённом Королевстве, Франции и Швеции в период с 1981 по 2004 г., и их сопоставления с данными о ГМА, измеренной по индексу  $A_p$ , V.L. Feigin с соавт. были рассчитаны коэффициенты риска и соответствующие 95%-е доверительные интервалы (ДИ). Установлено, что в целом ГМБ (индекс  $A_p$  60+) увеличивали риск развития инсульта на 19% (95% ДИ; 11–27%). Наиболее отчётливое триггерное воздействие ГМБ наблюдалось в объединённой группе лиц 16–64 лет, у которых риск инсульта увеличивался более чем на 50%: умеренные ГМБ (индекс  $A_p$  60–99) увеличивали риск инсульта на 27% (95% ДИ; 8–48%), сильные ГМБ (индекс  $A_p$  100–149) – на 52% (95% ДИ; 19–92%), а жёсткие (экстремальные) ГМБ (индекс  $A_p$  150+) – на 52% (95% ДИ; 19–94%) (тест на тенденцию,  $p < 2 \cdot 10^{-16}$ ). Для пациентов от 16 до 64 лет максимальными оказались коэффициенты риска развития субарахноидальных кровоизлияний в период умеренной ГМА [1,65 (1–2,7)], внутримозговых кровоизлияний при сильной ГМА [1,55 (0,82–2,93)], внутримозговых и субарахноидальных кровоизлияний во время жёсткой (экстремальной) ГМА [2,14 (1,05–4,36) и 2,5 (1,39–4,48) соответственно]. В возрастных группах от 64 до 75 лет и старше 75 лет эффект ГМА был менее выраженным. Для повышения объективности результатов был применён стратифицированный по времени перекрёстный дизайн исследования «случай – контроль» при анализе ежедневных данных о частоте инсультов у отдельных участников, сопряжённой с ежедневной ГМА по индексу  $A_p$ . Контрольные дни выбирались в зависимости от дня события, специфичного для каждого отдельного случая. Данные о ГМБ использовались в статистических расчётах после корректировки с учётом погодных параметров – среднесуточной температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности. Авторы пришли к выводу о том, что геомагнитные факторы действительно связаны с повышенным риском развития инсульта и должны рассматриваться наряду с другими установленными факторами риска для совершенствования профилактики инсультов у населения [34].

Позднее, в 2021 г., J. Vencloviene и соавт. проанализировали данные 1986–2010 гг. Каунасского регистра инсультов для выявления возможных связей между ежедневным числом ишемических инсультов (ИИ), геморагических инсультов (ГИ), субарахноидальных (САК) и внутримозговых кровоизлияний (ВМК) с космическими погодными явлениями для 597 пациентов с САК, 1147 – с ВМК и 7482 пациентов с ИИ. Дни с сильными ГМБ ( $A_p \geq 100$ ) были связа-

ны с более чем двукратным повышением риска САК и ГИ ( $p < 0,01$ ). При низкой ГМА повышались риски ВМК, ГИ и ИИ (коэффициенты риска с 95%-ми доверительными интервалами составили 2,51 (1,5–4,21); 2,33 (1,5–3,61) и 1,36 (1,03–1,81) соответственно. Дни солнечных вспышек (СВ) класса  $\geq X9$  сопровождалась 39%-м повышением риска ИИ, если же дни СВ приходились на 1–2-й дни после ГМБ, риск ИИ увеличивался на 76%, а риск любого типа инсульта – на 60%. Риск возникновения ГИ был более чем в два раза выше на следующий день после сильного (очень сильного) солнечного протонного события. Как и в работе V.L Feigin и соавт., результаты были получены в моделях с временной и сезонной стратификацией и поправкой на день недели и погодные условия и показали, что СА, очень низкая ГМА, а также сильные СВ и СПС могут быть связаны с повышенным риском различных типов инсульта [35].

В исследовании D. Sharoshnikov и соавт. (2014) был проведён анализ связей А-индекса локальной для Москвы ГМА и клинически подтверждённых госпитализаций в кардиологические отделения двух московских больниц с 1992 по 2005 г. по поводу ИМ (2833 случая) и ИГМ (1096 случаев). Число случаев МИ и ИГМ возрастало при увеличении индекса А с зависимостью, близкой к логарифмически-линейной. При этом эффект ГМБ (А-индекс  $> 30$ ) для ИМ и ИГМ был немедленным и достаточно значимым: относительный риск RR составлял 1,29 (1,19–1,4);  $p < 0,001$  для ИМ и 1,25 (1,1–1,42);  $p = 0,001$  для ИГМ [36].

Stoupe E с соавт. (2018) изучили данные 2008–2013 гг. для 1896 пациентов (1398 мужчин и 498 женщин), поступивших в университетскую больницу Каунаса с диагнозом острый ИМ (1188 пациентов) и ОКС (698 пациентов) и повышенными уровнями тропонина I (Tn I) или тропонина T (Tn T) – маркёров острого ИМ. Ежемесячные средние значения Tn I и Tn T сравнивали с ежемесячными показателями СА, ГМА и активности космических лучей. Были выявлены значимые корреляционные связи уровней Tn T в крови с четырьмя индексами СА и активностью космических лучей (нейтронной активностью в имп/мин). Коэффициенты корреляции уровней Tn T с индексами ГМА составили:  $A_p, r = 0,77, p = 0,0021$ ;  $K_p, r = 0,729, p = 0,0047$  [37].

В Каунасе исследовали связь между событиями космической погоды и сердечно-сосудистыми характеристиками 4076 пациентов, госпитализированных с ОКС (данные 2000–2005 гг.). В дни пересечения ГМБ (период между 1–3-м днями после ГМБ, совпадающие с 1–3-м днями до следующей ГМБ) риск ОКС возрастал у пациентов, страдающих ожирением (Odds Ratio, отношение шансов  $OR = 1,72; p = 0,008$ ). Риск фибрилляции желудочков был ассоциирован с областью взаимодействия потоков (ОВП) с лаг-периодом 0–3 дня ( $OR = 1,44; p = 0,049$ ). Риск ОКС у пациентов с хронической фибрилляцией предсердий был сопряжён с быстрым солнечным ветром ( $\geq 600$  км/с) (лаг 0–3 дня;  $OR = 1,39; p = 0,03$ ) и днями солнечных протонных событий (лаг 0–3), совпадающими с ОВП (лаг 0–3) ( $OR = 2,06; p = 0,021$ ) [38].

Там же изучали влияние геомагнитных бурь (ГМБ) и других явлений космической погоды (солнечные протонные события (СПС), солнечные вспышки (СВ), высокоскоростной солнечный ветер (ВССВ), межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) и области взаимодействия потоков (ОВП)) на заболеваемость острым инфарктом миокарда (ОИМ) по данным о 12 330 случаях ОИМ (мужчины/женщины,  $n = 6942/5388$ , возраст 25 лет – 64 года и старше 65 лет) в период 2000–2015 гг. Оказалось, что наиболее высокий риск ОИМ связан с трёхдневным периодом до ГМБ

и однодневным – после ГМБ ( $A_p \geq 30$ ). Наиболее сильный эффект ВССВ соответствовал дню события при суточной скорости солнечного ветра  $> 530$  км/с. Увеличение риска случаев ОИМ было связано с днями возникновения СП Х-класса и с одним днём после них. Значимые ассоциации могли проявляться между риском ОИМ и возникновением СП в течение ГМБ. Статистически значимое увеличение относительного риска (ОР) случаев ОИМ обнаружено между вторым и четвёртым днями периода МКВМ; влияние ГМБ, МКВМ и СПС было сильнее выражено у женщин, а влияние СП Х-класса и ВССВ – у мужчин [39].

## Заключение

В рассмотренных выше научных сообщениях приводятся результаты исследований, подтверждающие существование количественно измеряемых и статистически достоверных корреляционных связей между различными показателями СА и ГМА и ухудшением течения БСК, особенно таких, как ОКС, ИМ и ИГМ различных типов, а также высоких уровней риска (средние коэффициенты риска 1,25–2,5) развития ССО, обусловленных колебаниями космической погоды, СА и ГМА. Полученные результаты имеют безусловную ценность, однако необходимо отметить разнохарактерность выбираемых авторами для поиска зависимостей гелиогеофизических факторов, что затрудняет формирование общей картины их влияния на ССС, как это сделано в настоящее время для действия метеорологических факторов [6]. Ограничения исследований во многом связаны с различиями в их методологии, подходах к оценке гелиогеомагнитной активности и методах статистического анализа. Кроме того, J. Belenko и соавт. и O. Gaisenk и соавт. подчёркивали, что такие наблюдения нужно считать предварительными. Данных для выделения причинно-следственных связей по-прежнему недостаточно, в том числе из-за возможности одновременного действия неконтролируемых факторов окружающей среды и множества механизмов, зависящих от пола, возраста, сезона, региона местоположения, погодных условий и социально-экономических факторов, вследствие которых в результатах оценок сохраняются противоречия. Подтверждение объективности таких связей могло бы улучшить профилактику ССО, зависящих от СА и ГМА, путём использования гелиогеомагнитного мониторинга в системе предупреждения пациентов с БСК о неблагоприятном действии на них периодов высокой солнечной, космической и геомагнитной активности [40, 41]. К сожалению, в большинстве работ авторы проводят только ретроспективный анализ связей между ССО и динамикой СА и ГМА на основании данных 1981–2015 гг. Необходимы новые современные проспективные исследования с наблюдениями за реакциями организма пациентов с БСК на СА, космическую погоду и ГМА в реальном времени и ориентацией на новые методологические принципы гелиобиологических исследований, разработанные Т.А. Зенченко и Т.К. Бреус [33]. Следует отметить, что такие исследования позволят научно обосновать и оценить риск для здоровья населения, связанный с влиянием СА, что предусмотрено Отраслевым планом адаптации к изменениям климата в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения на 2022 г. Таким образом, в перспективе станет возможным разработать стандартизованный перечень показателей СА и ГМА, контроль которых СГМ в настоящее время не предусмотрен, для официального включения в систему документов СГМ.

## Литература

(п.п. 34–41 см. References)

1. Коваленко В.А., Жеребцов Г.А. Влияние солнечной активности на изменение климата. *Оптика атмосферы и океана*. 2014; 27(2): 134–38. <https://elibrary.ru/slazsh>
2. Украинцева В.В. Солнце – главный двигатель изменений климата на планете Земля. *Общество. Среда. Развитие*. 2024; (2): 105–08. [https://doi.org/10.53115/19975996\\_2024\\_02\\_105\\_108](https://doi.org/10.53115/19975996_2024_02_105_108) <https://elibrary.ru/uewmbl>

3. Катцов В.М. (ред.) Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Научное издание; 2022. 676 с. <https://elibrary.ru/jnixie>
4. Носков С.Н., Бузинов Р.В., Сырин С.А., Еремин Г.Б., Карелин А.О., Гудков А.Б. и др. Современные представления о влиянии земной и космической погоды на здоровье человека (обзор). *Журнал медико-биологических исследований*. 2023; 11(2): 232–47. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z143> <https://elibrary.ru/wpclam>
5. Толстов П.В., Калягин А.Н., Татаринова М.Б. Влияние гелиогеофизических и природно-климатических факторов на сердечно-сосудистую систему (обзор литературы). *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2023; 22(8): 92–102. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3599> <https://elibrary.ru/ttolaw>
6. Егорова Н.А., Кочеткова М.Г., Рыжова И.Н. Значение природно-климатических факторов в социально-гигиеническом мониторинге (обзор литературы, часть 2). Метеофакторы и сердечно-сосудистые заболевания. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(5): 499–506. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-5-499-506> <https://elibrary.ru/djdub>
7. Носков С.Н., Борисова Д.С., Еремин Г.Б., Исаев Д.С., Ковшов А.А., МIRONENKO О.В. и др. Влияние космической погоды на здоровье человека. Аналитический обзор. *Вестник Санкт-Петербургского университета: Медицина*. 2024; 19(1): 54–74. <https://doi.org/10.21638/spbu11.2024.105> <https://elibrary.ru/vefkl>
8. Комзин К.В. Фундаментальные аспекты биотропного влияния факторов космической погоды. *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины*. 2023; 13(2): 71–84. <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2023-13-2-71-84> <https://elibrary.ru/dmebvz>
9. Стрекаловская А.А., Паршина С.С. Космическая погода и здоровье человека: современное состояние вопроса. *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2021; 17(3) (Приложение Кардиология): 578–81. <https://ssmj.ru/2021/3/578>
10. Колжиков В. А., Оводенко А.М. Солнце и его влияние на жизнь Земли. *Уникальные исследования XXI век*. 2015; 5(5): 85–92. <https://elibrary.ru/twtwbv>
11. Вернадский В. И. *Биосфера и ноосфера*. М.: Айрис-пресс; 2007. 576 с.
12. Чижевский А.Л. *Земное эхо солнечных бурь*. М.: Мысль; 1973. 352 с.
13. Чижевский А.Л. *Космический пульс жизни: Земля в объёмах Солнца. Гелиотараксия*. М.: Мысль; 1995. 768 с.
14. Ловещкий Г.И. Развитие античных представлений о крови и воздухе в работах А.Л. Чижевского. *Гуманитарный вестник*. 2015; (4): 2. <https://doi.org/10.18698/2306-8477-2015-4-240> <https://elibrary.ru/tscprx>
15. Карпин В.А., Гудков А.Б., Усынин А.Ф., Столяров В.В. Анализ влияния гелиогеомагнитных аномалий на жителей северной урбанизированной территории. *Экология человека*. 2018; (11): 10–15. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-11-10-15> <https://elibrary.ru/ynwbv>
16. Эфендиева Л.Г., Азизов В.А., Етирмишли Г.Д. Влияние геофизических параметров на организм человека. *Медицинские новости*. 2020; (1): 43–47. <https://elibrary.ru/peptrr>
17. Смирнова М.Д., Шапошников Д.А., Фофанова Т.В., Агеев Ф.Т., Палеев Ф.Н. Влияние сезонности и планетарного индекса геомагнитной активности на артериальное давление и частоту сердечных сокращений. *Кардиологический вестник*. 2025; 20(4–2): 126–34. <https://doi.org/10.17116/Cardiobulletin202520042126> <https://elibrary.ru/tpmnhj>
18. Токаева Л.К., Самсонов И.Ю., Мигаль А.С., Эркенова З.С. Современные представления о влиянии космофизических факторов на здоровье человека. *Психосоматические и интегративные исследования*. 2022; 8(1): 1–6. <https://elibrary.ru/vbougpr>
19. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности. *Космическая техника и технологии*. 2014; 3(6): 3–13. <https://elibrary.ru/temdoh>
20. Казанцев Л.В., Ступин В.В. Изучение зависимости значений показателя смертности, вызванной ишемической болезнью сердца от гелиомагнитной активности. *Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права)*. 2012; (4): 34–38. <https://elibrary.ru/pdfxml>
21. Ботоева Н.К., Хетагурова Л.Г., Рапопорт С.И. Заболеваемость инфарктом миокарда во Владикавказе в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. *Клиническая медицина*. 2013; 91(10): 28–34. <https://elibrary.ru/rtrskp>
22. Мартиросян В.В., Долгушева Ю.А. Вероятностный анализ влияния экзогенных факторов риска на частоту возникновения геморрагического инсульта в периоды высокой и низкой солнечной активности. *Журнал фундаментальной медицины и биологии*. 2016; (1): 52–59. <https://elibrary.ru/wcbtyl>
23. Носков С.Н., Карелин А.О., Головина Е.Г., Ступишина О.М., Еремин Г.Б. Оценка взаимосвязи обращаемости населения за медицинской помощью с факторами земной и космической погоды. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(8): 775–81. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-775-781> <https://elibrary.ru/pwzww>
24. Карнин В.А., Прокопьев М.Н., Неголюк Ю.И. Ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия и геомагнитная активность. *Вестник Сургутского государственного университета Медицина*. 2008; (1): 124–27. <https://elibrary.ru/rxbnjv>
25. Еськов В.М., Неголюк Ю.И., Полухин В.В., Горбунова М.Н. Математическое моделирование колебательной динамики экофакторов и развития неотложных состояний у больных с хроническими неинфекционными заболеваниями в урбанизированных экосистемах. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020; (2): 78–87. <https://doi.org/10.12737/2306-174X-2020-78-87> <https://elibrary.ru/jsgrnu>
26. Толстов П.В., Калягин А.Н., Татаринова М.В. Влияние электромагнитной активности Солнца на возникновение острых сердечно-сосудистых осложнений. *Сибирское медицинское обозрение*. 2025; (2): 56–59. <https://doi.org/10.20333/25000136-2025-2-56-59> <https://elibrary.ru/ovksqs>
27. Толстов П.В., Калягин А.Н., Татаринова М.Б. Влияние солнечной активности на частоту острых нарушений мозгового кровообращения: ретроспективный анализ данных скорой помощи. *Доктор.Ру*. 2025; 24(8): 44–47. <https://doi.org/10.31550/1727-2378-2025-24-8-44-47> <https://elibrary.ru/vnvuwa>
28. Баженов А.А., Аверина А.С., Прикоп М.В. Влияние гелиогеофизических факторов на здоровье человека. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2014; 6(100): 125–29. <https://elibrary.ru/uceaip>
29. Михайлова З.Д., Климин П.Ф., Шаленкова М.А., Манюкова Э.Т., Гайдаш С.П. Оценка значимости уровня мелатонина и некоторых метеорологических и гелиогеофизических факторов у больных с острым коронарным синдромом. *Клиническая медицина*. 2017; 95(10): 888–93. <https://doi.org/10.18821/0023-2149-2017-95-10-888-893> <https://elibrary.ru/zweijt>
30. Гаджиев Г.Д., Гречаный Г.В. Геомагнитные бури и их влияние на показатели заболеваемости сотрудников научно-исследовательских институтов Иркутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. *Байкальский медицинский журнал*. 2007; 75(8): 59–62. <https://elibrary.ru/pazqpn>
31. Заславская Р., Шербань Э., Тейблум М. Влияние метеорологических и геомагнитных факторов на сердечно-сосудистую систему. *International Independent Scientific Journal*. 2021; (23–1): 5–15. <https://elibrary.ru/aiufst>
32. Михайлис А.А., Микуляк Н.И., Вершинина О.Д. Влияние вспышечной активности Солнца и геомагнитных бурь на цикличность проявления церебральных и коронарных сосудистых катастроф. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки*. 2019; 2(50): 152–63. <https://doi.org/10.21685/2072-3032-2019-2-14> <https://elibrary.ru/aewkds>
33. Зенченко Т.А., Бреус Т.К. Возможные причины нестабильности воспроизведения гелиобиологических результатов. *Физика биологии и медицины*. 2023; (1): 4–25. <https://doi.org/10.7256/2730-0560.2023.1.39903> <https://elibrary.ru/svjodz>

## References

1. Kovalenko V. A., Zherebtsov G. A. Influence of solar activity on climate changes. *Optika atmosfery i okeana*. 2014; 27(2): 134–38. <https://elibrary.ru/slazsh> (in Russian)
2. Ukraintseva V.V. The sun is the main engine of climate change on planet Earth. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*. 2024; (2): 105–08. [https://doi.org/10.53115/19975996\\_2024\\_02\\_105\\_108](https://doi.org/10.53115/19975996_2024_02_105_108) <https://elibrary.ru/uewmbl> (in Russian)
3. Kattsov V.M. (ed.) *Third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation*. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii; 2022. 676 p. <https://elibrary.ru/jnixie> (in Russian)
4. Noskov S.N., Buzinov R.V., Syurin S.A., Eremin G.B., Karelin A.O., Gudkov A.B., et al. Modern concepts of the impact of terrestrial and space weather on human health (review). *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy [Journal of Medical and Biological Research]*. 2023; 11(2): 232–47. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z143> <https://elibrary.ru/wpclam> (in Russian)
5. Tolstov P.V., Kalyagin A.N., Tatarinova M.B. Influence of heliogeophysical and climatic factors on the cardiovascular system: a literature review. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika [Cardiovascular Therapy and Prevention]*. 2023; 22(8): 92–102. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3599> <https://elibrary.ru/ttolaw> (in Russian)
6. Egorova N.A., Kochetkova M.G., Ryzhova I.N. The importance of natural and climatic factors in social and hygienic monitoring (literature review, part 2). Meteorological factors and cardiovascular diseases. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2026; 105(5): 499–506. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-5-499-506> <https://elibrary.ru/djdub> (in Russian)
7. Noskov S.N., Borisova D.S., Yeremin G.B., Isaev D.S., Kovshov A.A., Mironenko O.V., et al. The impact of space weather on human health. Analytical review. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta: Meditsina [Vestnik of Saint Petersburg University: Medicine]*. 2024; 19(1): 54–74. <https://doi.org/10.21638/spbu11.2024.105> <https://elibrary.ru/vefkl> (in Russian)
8. Komzin K.V. Fundamental aspects of the biotropic influence of space weather factors. *Krymskii zhurnal eksperimental'noi i klinicheskoi meditsiny. [Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine]*. 2023; 13(2): 71–84. <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2023-13-2-71-84> <https://elibrary.ru/dmebvz> (in Russian)
9. Strekalovskaya A.A., Parshina S.S. Space weather and human health: current state of the issue (review). *Saratovskii nauchno-meditsinskii zhurnal [Journal of Medical Scientific Research]*. 2021; 17(3) (supplement Cardiology): 578–81. <https://ssmj.ru/2021/3/578> <https://elibrary.ru/yptwtl> (in Russian)

10. Kolzhikov V.A., Ovodenko A.M. The sun and its influence on the life of the Earth. *Unikal'nye issledovaniya XXI vek [Unique research of the XXI century]*. 2015; (5(5)): 85–92. <https://elibrary.ru/twtwbv> (in Russian)
11. Vernadsky V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow: Iris-press; 2007. 576 p. (in Russian)
12. Chizhevsky A.L. *Earthly echo of solar storms [Zemnoe jecho solnechnyh bur']* Moscow: Mysl'; 1973. 352 p. (in Russian)
13. Chizhevsky A.L. *The Cosmic Pulse of Life: The Earth in the Embrace of the Sun. Heliotaraxia [Kosmicheskii pul's zhizni: Zemlya v ob'yatiakh Solntsa. Geliotaraksija]*. Moscow: Mysl'; 1995. 768 p. (in Russian)
14. Lovetsky G.I. Development of the Ancient Ideas of Blood and Air in the Works of A.L. Chizhevsky. *Gumanitarnyi vestnik*. 2015; (4): 2. <https://doi.org/10.18698/2306-8477-2015-4-240> <https://elibrary.ru/tsccpx> (in Russian)
15. Karpin V.A., Gudkov A.B., Usinin A.F., Stolyarov V.V. Analysis of the Heliogeomagnetic Anomaly Influence on the Inhabitants of the Northern Urbanized Area. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2018; (11): 10–15. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-11-10-15> <https://elibrary.ru/ynwbvt> (in Russian)
16. Afandiyeva L.Q., Azizov V.A., Yetirmishli G.J. The influence of geophysical parameters on the human body. *Meditsinskie novosti*. 2020; (1): 43–47. <https://elibrary.ru/pcptrr> (in Russian)
17. Smirnova M.D., Shaposhnikov D.A., Fofanova T.V., Ageev F.T., Paleev F.N. Effect of seasonality and planetary geomagnetic activity index on blood pressure and heart rate. *Kardiologicheskii vestnik [Russian Cardiology Bulletin]*. 2025; 20(4–2): 126–34. <https://doi.org/10.17116/Cardiobulletin202520042126> <https://elibrary.ru/tpmnhj> (in Russian)
18. Tokaeva L.K., Samsonov I.Y., Migal A.S., Erkenova Z.S. Modern ideas about the influence of cosmophysical factors on human health. *Psichosomaticheskie i integrativnye issledovaniya [Psychosomatic and Integrative Research]*. 2022; 8(1): 1–6. <https://elibrary.ru/vbougp> (in Russian)
19. Kuznetsov V.D. Space weather and risks of space activity. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014; 3(6): 3–13. <https://elibrary.ru/temdoh> (in Russian)
20. Kazantsev L.V., Stupin V.V. Dependence of indicator values of coronary heart disease mortality on heliomagnetic activity. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii [Baikal'skij gosudarstvennyj universitet ekonomiki i prava]*. 2012; (4): 34–38. <https://elibrary.ru/pdfxmi> (in Russian)
21. Botoeva N.K., Khetagurova L.G., Rapoport S.I. A comprehensive analysis of incidence of myocardial infarction in Vladikavkaz depending on solar and geomagnetic activity. *Klinicheskaya medicina*. 2013; 91(10): 28–34. <https://elibrary.ru/rrrskp> (in Russian)
22. Martirosyan V.V., Dolgusheva Yu.A. The probabilistic analysis of influence of exogenous risk factors on the frequency of developing of hemorrhagic stroke during the periods of high and low solar activity. *Zhurnal fundamental'noj mediciny i biologii*. 2016; (1): 52–59. <https://elibrary.ru/wcbtyl> (in Russian)
23. Noskov S.N., Karelin A.O., Golovina E.G., Stupishina O.M., Yeregin G.B. Assessment of the relationship of the population's medical care with the factors of Earth and Space weather. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(8): 775–81. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-775-781> <https://elibrary.ru/pvwzww> (in Russian)
24. Karmin V.A., Prokop'ev M.N., Negoljuk Ju.I. Ischemic heart disease, arterial hypertension and geomagnetic activity. *Vestnik Surgut'skogo gosudarstvennogo universiteta. Meditsina*. 2008; (1): 124–27. <https://elibrary.ru/rxbnjv> (in Russian)
25. Eskov V.M., Negolyk Y.I., Poluchin V.V., Gorbunova M.N. Mathematical modeling of oscillatory dynamics of ecology factors and development of emergencies in patients with chronic non-infectious diseases in urbanized ecosystems. *Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Reason. Post-non-classical.]*. 2020; (2): 78–87. <https://doi.org/10.12737/2306-174X-2020-78-87> <https://elibrary.ru/jsginu> (in Russian)
26. Tolstov P.V., Kalyagin A.N., Tatarinova M.B. Influence of solar electromagnetic activity on the occurrence of acute cardiovascular complications. *Siberian Medical Review*. 2025; (2): 56–59. <https://doi.org/10.20333/25000136-2025-2-56-59> <https://elibrary.ru/ovkxgs> (in Russian)
27. Tolstov P.V., Kalyagin A.N., Tatarinova M.B. The influence of solar activity on the incidence of acute cerebrovascular accidents: a retrospective analysis of emergency medical services data. *Doctor.Ru*. 2025; 24(8): 44–47. <https://doi.org/10.31550/1727-2378-2025-24-8-44-47> <https://elibrary.ru/vnvuwa> (in Russian)
28. Bazhenov A.A., Averina A.S., Prikop M.V. Influence of heliogeophysical factors on human health. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo centra Sibirskogo otdeleniya Rossijskoy akademii medicinskix nauk [Acta Biomedica Scientifica]*. 2014; 6(100): 125–29. <https://elibrary.ru/uceaip> (in Russian)
29. Mikhailova Z.D., Klimkin P.F., Shalenkova M.A., Manyukova E.T., Gaidash S.P. Evaluation of significance of melatonin and some atmospheric and heliogeophysical factors for patients with acute coronary syndrome. *Klin. med.* 2017; 95(10): 888–93. <https://doi.org/10.18821/0023-2149-2017-95-10-888-893> <https://elibrary.ru/zweijt> (in Russian)
30. Gadzhiev G.D., Grechany G.V. Geomagnetic storms and their influence of morbidity of employees of scientific research institutes of the Irkutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Baikal'skii meditsinskii zhurnal [Baikal Medical Journal]*. 2007; 75(8): 59–62. <https://elibrary.ru/pazqpn> (in Russian)
31. Zaslavskaya R., Shcherban E., Tejblum M. Impact of meteorological and geomagnetic factors on cardiovascular system. *International Independent Scientific Journal*. 2021; (23–1): 5–15. <https://elibrary.ru/aiufst> (in Russian)
32. Mikhaylis A.A., Mikulyak N.I., Vershinina O.D. Influence of solar flare activity and geomagnetic storms on the manifestation cyclicity of cerebral and coronary vascular catastrophes *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Medicinskii nauki*. 2019; 2(50): 152–63. <https://doi.org/10.21685/2072-3032-2019-2-14> <https://elibrary.ru/aeuwks> (in Russian)
33. Zenchenko T.A., Breus T.K. Possible causes of instability in the reproduction of heliobiological results. *Fizika biologii i meditsiny [Physics of Biology and Medicine]*. 2023; (1): 4–25. <https://doi.org/10.7256/2730-0560.2023.1.39903> <https://elibrary.ru/svjodz> (in Russian)
34. Feigin V.L., Parmar P.G., Barker-Collo S., Bennett D.A., Anderson C.S., Thrift A.G., et al. International stroke incidence studies data pooling project collaborators. Geomagnetic storms can trigger stroke: evidence from 6 large population-based studies in Europe and Australasia. *Stroke*. 2014; 45(6): 1639–45. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.113.004577> <https://elibrary.ru/uwdbgr>
35. Vencloviene J., Radisauskas R., Tamosiunas A., Luksiene D., Sileikiene L., Milinaviciene E. Possible associations between space weather and the incidence of stroke. *Atmosphere*. 2021; 12 (3): 334. <https://doi.org/10.3390/atmos12030334> <https://elibrary.ru/znggok>
36. Shaposhnikov D., Revich B., Gurfinkel Y., Naumova E. The influence of meteorological and geomagnetic factors on acute myocardial infarction and brain stroke in Moscow, Russia. *Int J Biometeorol*. 2014; 58(5): 799–808. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0660-0> <https://elibrary.ru/ugpipz>
37. Stoupe E., Radisauskas R., Bernotiene G., Tamosiunas A., Virviciute D. Blood troponin levels in acute cardiac events depends on space weather activity components (a correlative study). *J Basic Clin Physiol Pharmacol*. 2018; 29(3): 257–63. <https://doi.org/10.1515/jbcp-2017-0148> <https://elibrary.ru/vegapb>
38. Kiznys D., Vencloviene J., Milvidaitė I. The associations of geomagnetic storms, fast solar wind, and stream interaction regions with cardiovascular characteristic in patients with acute coronary syndrome. *Life Sci Space Res (Amst)*. 2020; 25: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.01.002> <https://elibrary.ru/nlfuuu>
39. Vaičiulis V., Lukšienė D., Radisauskas R., Vencloviene J., Kiznys D., Tamosiunas A., Krančiukaitė-Butykinienė D. Associations between Space weather events and the incidence of acute myocardial infarction and deaths from ischemic heart disease. *Atmosphere*. 2021; 12: 306. <https://doi.org/10.3390/atmos12030306> <https://elibrary.ru/pswwed>
40. Gaisenok O., Gaisenok D., Bogachev S. The influence of geomagnetic storms on the risks of developing myocardial infarction, acute coronary syndrome, and stroke: systematic review and meta-analysis. *J Med Phys*. 2025; 50(1): 8–13. [https://doi.org/10.4103/jmp.jmp\\_122\\_24](https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_122_24) <https://elibrary.ru/ivgsje>
41. Belenko J., Cancel G., Mayrovitz H.N. Exploring the potential observations between geomagnetic activity and cardiovascular events: a scoping review. *Cureus*. 2025; 17(12): e99851. <https://doi.org/10.7759/cureus.99851> <https://elibrary.ru/sijbtr>

## Сведения об авторах

**Егорова Наталья Александровна**, доктор мед. наук, вед. науч. сотр., ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: NEgorova@cspmrz.ru

**Кочеткова Марина Германовна**, науч. сотр., ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: MKochetkova@cspmrz.ru

**Рыжова Ирина Николаевна**, канд. мед. наук, вед. специалист, ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: IRyzhova@cspmrz.ru

## About the authors

**Natalija A. Egorova**, DSc (Medicine), leading researcher, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6751-6149> E-mail: NEgorova@cspmrz.ru

**Marina G. Kochetkova**, researcher, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9616-4517> E-mail: MKochetkova@cspmrz.ru

**Irina N. Ryzhova**, PhD (Medicine), leading specialist, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0696-5359> E-mail: IRyzhova@cspmrz.ru

К статье Н.В. Зайцевой и соавт.  
To the article by Nina V. Zaitseva et al.

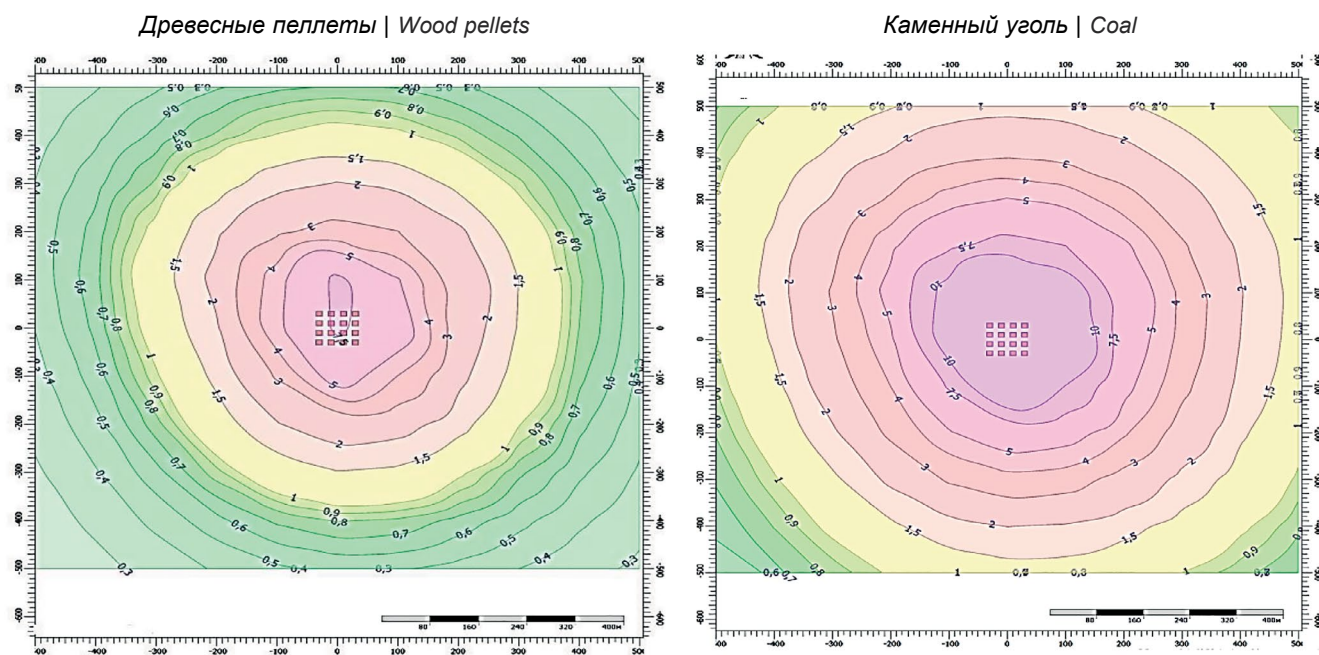


Рис. 1. Поля среднесуточных концентраций бенз(а)пирена, формируемых автономными источниками теплоснабжения на стадии розжига.

Fig. 1. Daily average ground-level benzo[a]pyrene concentration fields generated by AHSs during the ignition stage.

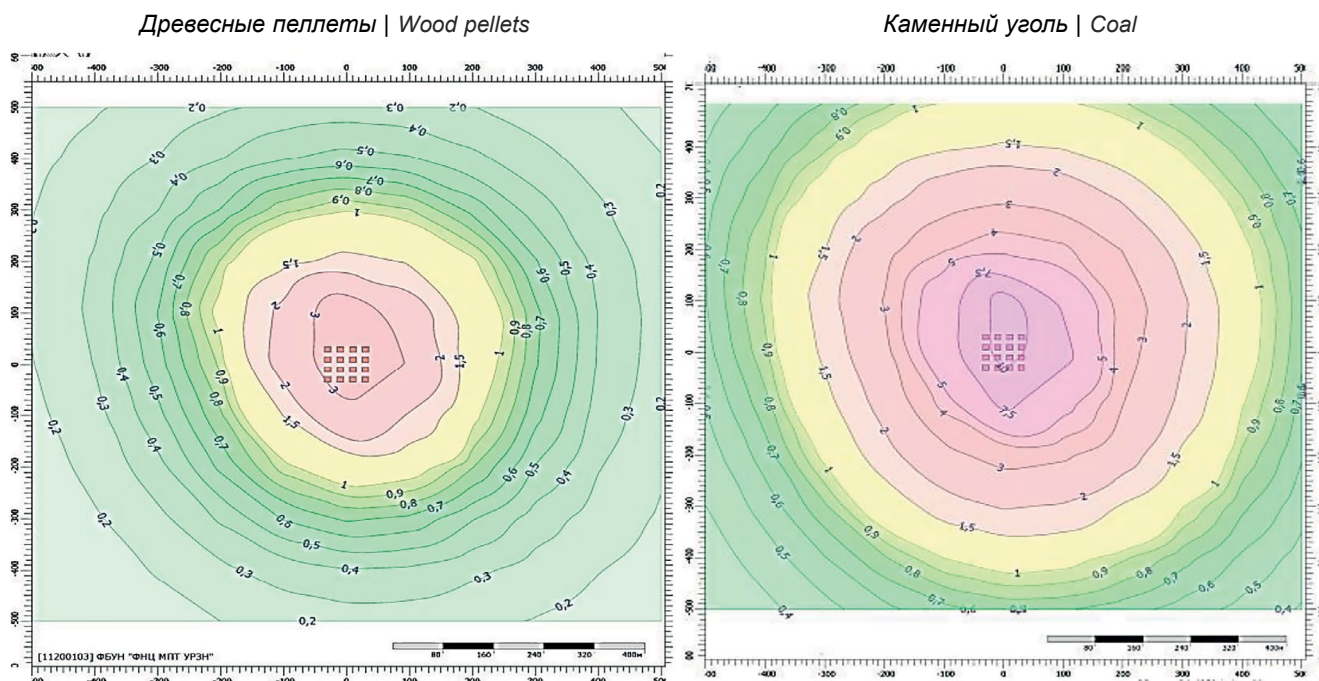


Рис. 2. Поля среднесуточных концентраций бенз(а)пирена, формируемых автономными источниками теплоснабжения на стадии стационарного горения.

Fig. 2. Daily average ground-level benzo[a]pyrene concentration fields generated by AHSs during the steady-state combustion stage.

К статье Н.Л. Якимовой и соавт.  
To the article by Natalya L. Yakimova et al.

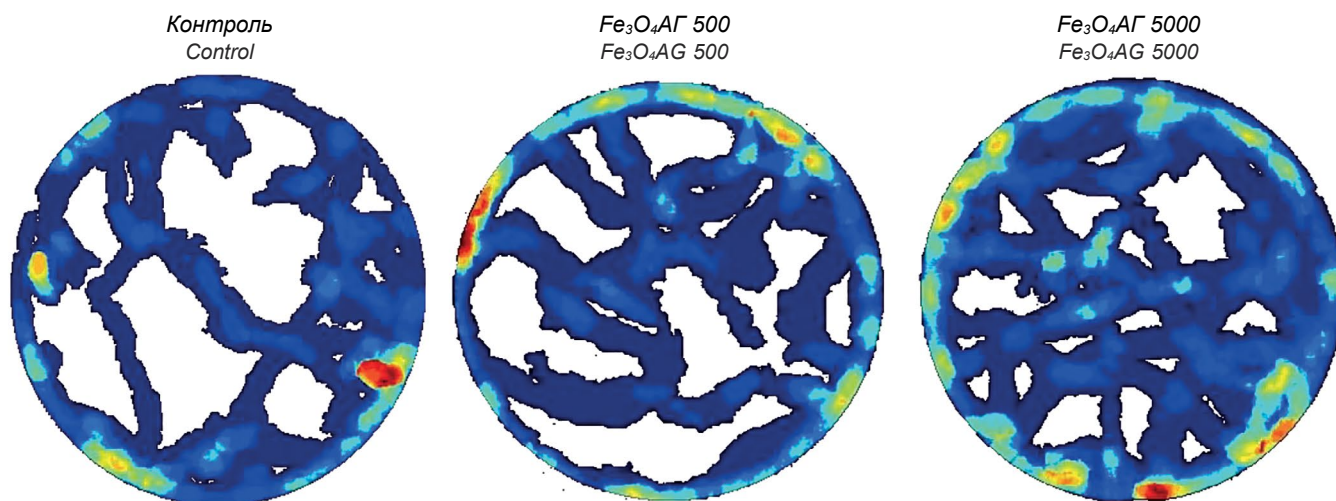


**Рис. 1.** Репрезентативная визуализация активности животных во время тестирования в «открытом поле» (красный – самая высокая активность; синий – самая низкая активность, голубой/зелёный – средняя активность, белый – животное в данной точке отсутствовало). Ранний период обследования (1-й срок).

**Fig. 1.** Representative visualization of animals' activity during «open field» testing (red – highest activity; blue – lowest activity; light blue/green – average activity; white – no animal present at this point). Early examination period (1 term).

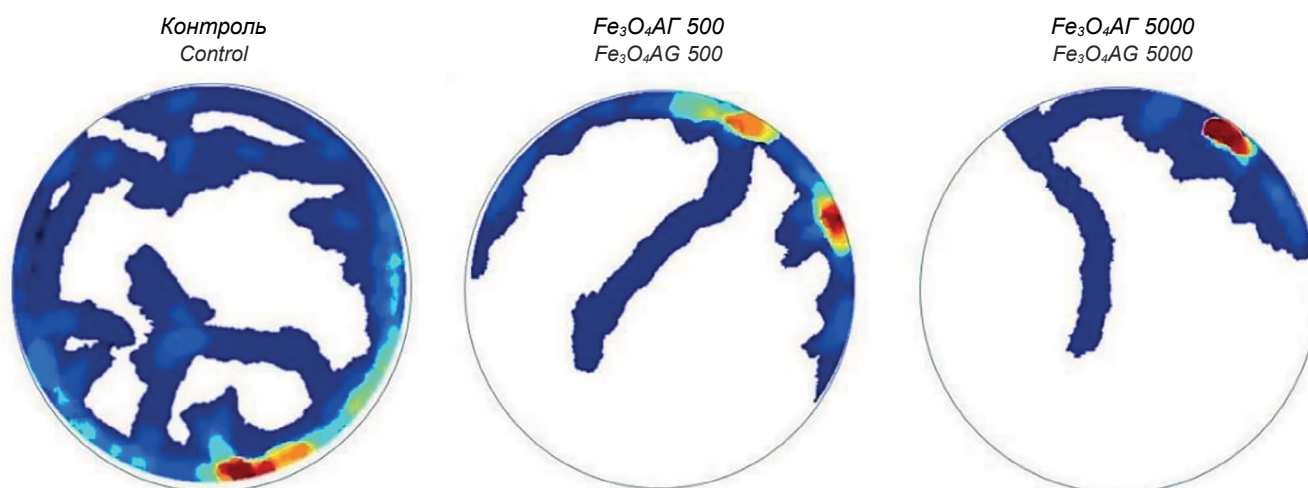


**Рис. 2.** Репрезентативная визуализация активности животных во время тестирования в «открытом поле». Отдалённый период обследования (2-й срок).

**Fig. 2.** Representative visualization of animals' activity during «open field» testing. Late examination period (2 term).

К статье В.А. Вокиной и соавт.  
To the article by Vera A. Vokina et al.

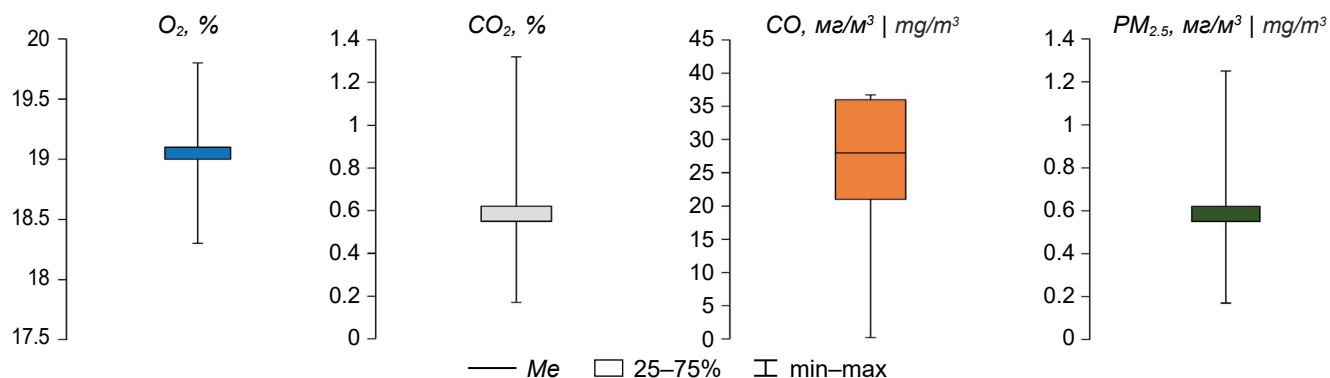


Рис. 1. Характеристика воздушной среды в экспозиционной камере при моделировании торфяного пожара.

Fig. 1. Characteristics of the air environment in the exposure chamber during peat fire simulation.

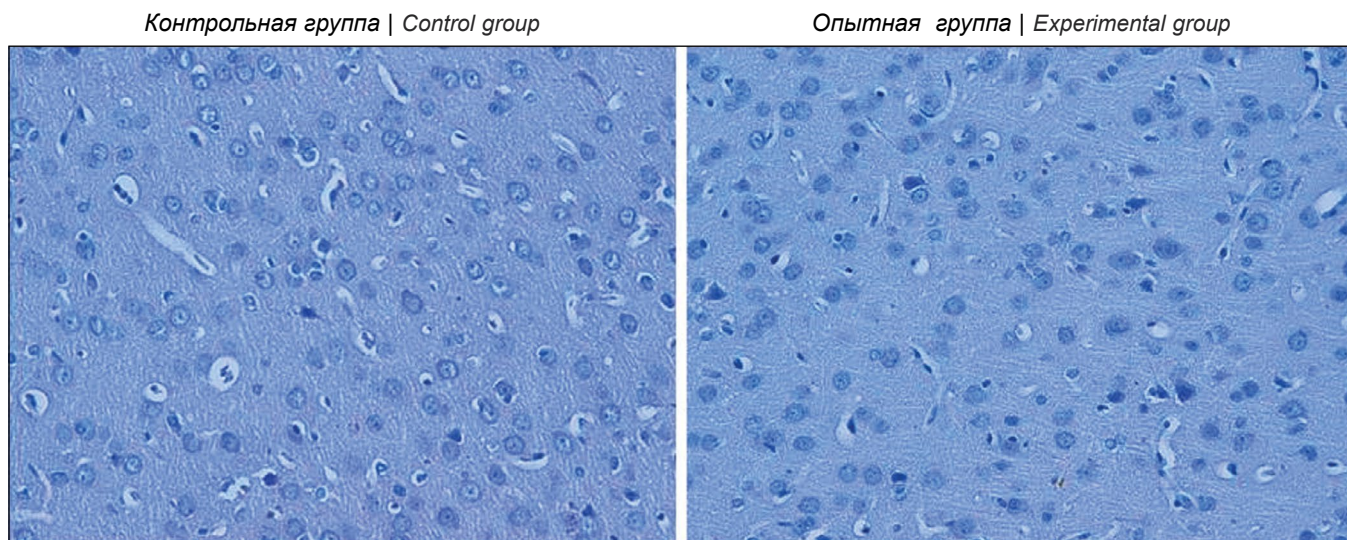


Рис. 2. Ткань головного мозга белых крыс после экспозиции торфяным дымом. Увеличение  $\times 400$ . Окрашивание гематоксилином и эозином.

Fig. 2. Brain tissue in white rats exposed to peat smoke.  $\times 400$ . Stained with hematoxylin and eosin.

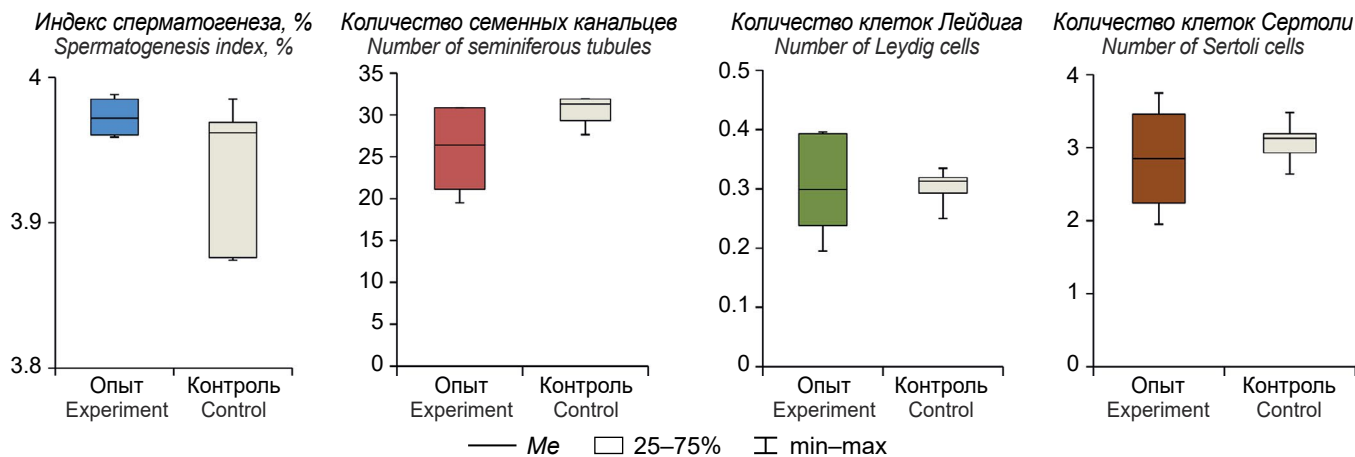


Рис. 3. Результаты морфометрического исследования семенников белых крыс.

Fig. 3. Results of morphometric analysis of the testes in rats.

К статье М.А. Новикова и соавт.  
To the article by Mikhail A. Novikov et al.

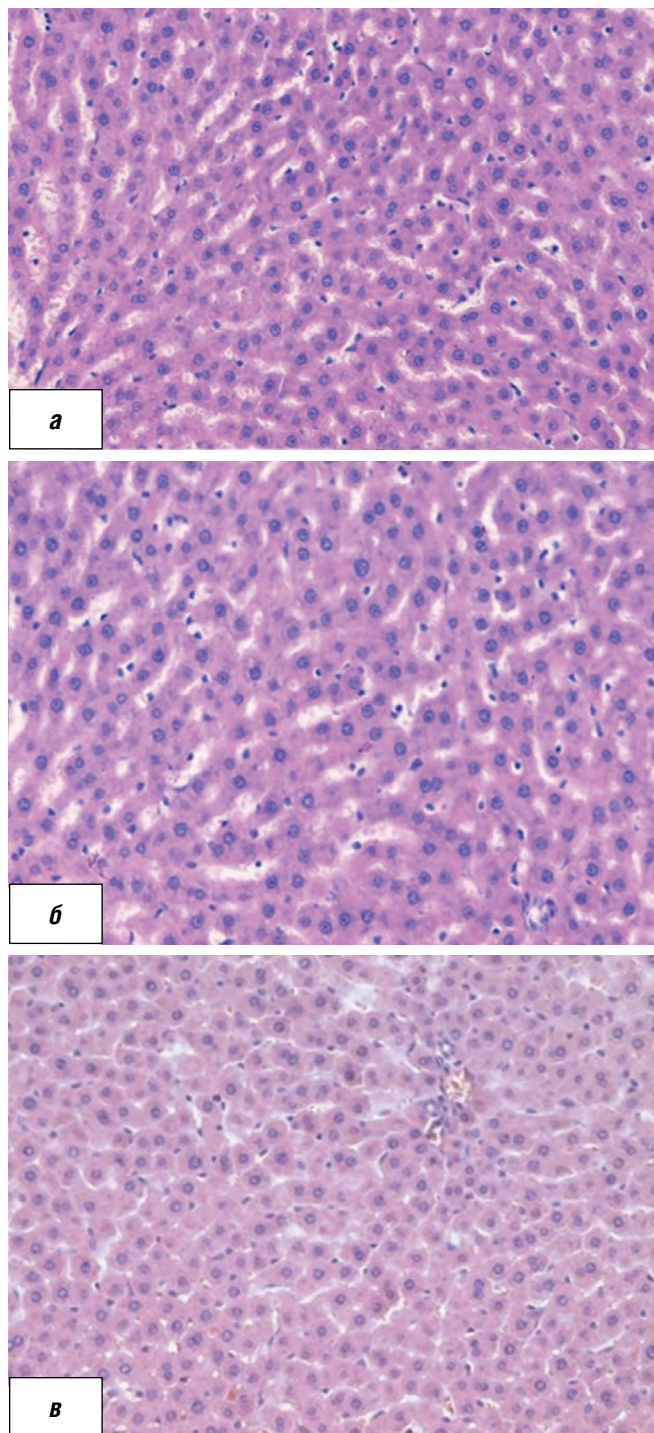


**Рис. 1.** Печень белой крысы при воздействии Gd-АГ: *а* – GdAG500; *б* – GdAG5000; *в* – контроль. Окрашивание гематоксилином и эозином. Увеличение  $\times 400$ .

**Fig. 1.** Liver in a white rat exposed to Gd-AG: *a* – GdAG500; *б* – GdAG5000; *в* – control. Stained with hematoxylin and eosin.  $\times 400$ .

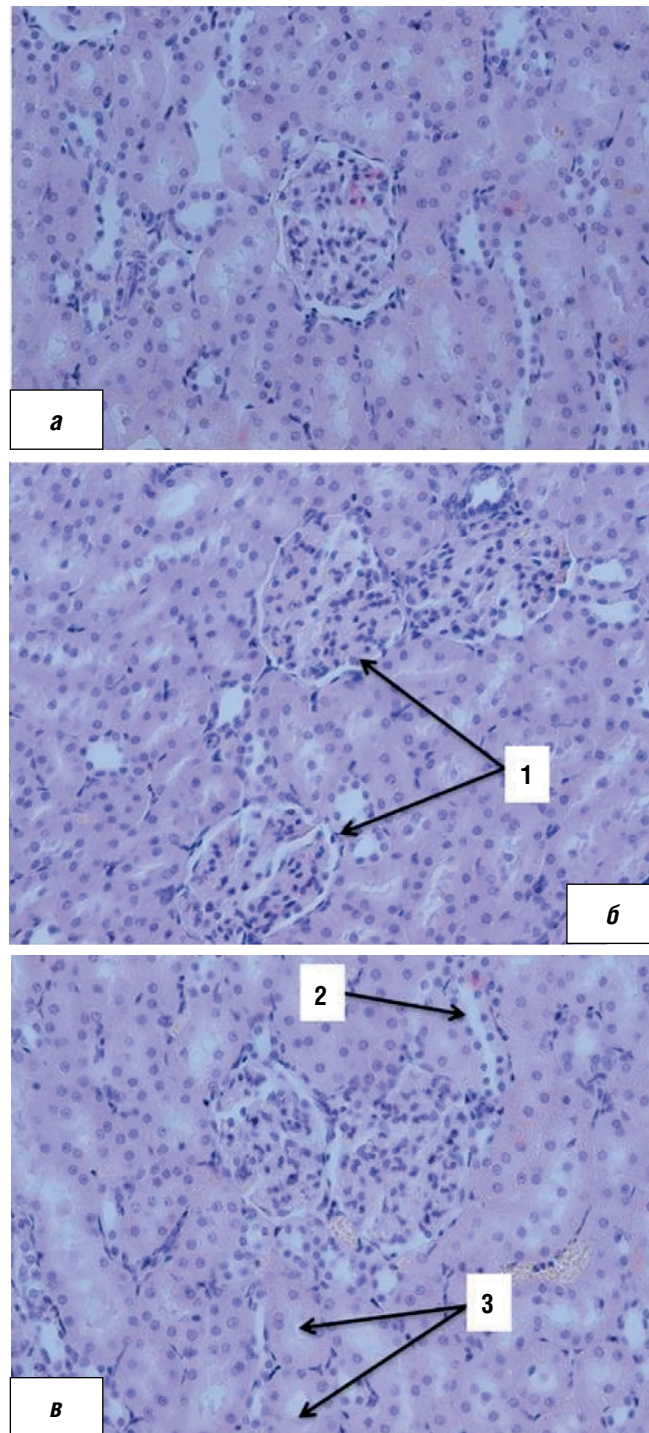


**Рис. 2.** Кортикальное вещество почки белой крысы при воздействии Gd-АГ в дозе 500 и 5000 мкг/кг в ранний период исследования; 1 – почечные тельца и камера Шумлянського – Боумана; 2 – дистальные извитые канальцы коркового вещества почки; 3 – проксимальные извитые канальцы коркового вещества почки; *а* – GdAG500; *б* – GdAG5000; *в* – контроль. Окрашивание гематоксилином и эозином. Увеличение  $\times 400$ .

**Fig. 2.** Renal cortex in a white rat exposed to Gd-AG at doses of 500 and 5000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  in the early period of examination; 1 – renal corpuscles and Shumlyansky-Bowman chamber; 2 – distal convoluted tubules of the renal cortex; 3 – proximal convoluted tubules of the renal cortex; *a* – GdAG500; *б* – GdAG5000; *в* – control. Stained with hematoxylin and eosin.  $\times 400$ .