

ISSN 1728-0869 (Print)
ISSN 2949-1444 (Online)

ЭКОЛОГИЯ



ЧЕЛОВЕКА

EKOLOGIYA CHELOVEKA
(HUMAN ECOLOGY)

Volume 32, Issue 10, 2025

10
Том 32
2025



УЧРЕДИТЕЛИ:

- ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» Минздрава России;
- ООО «Эко-Вектор»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 20 марта 2020 г. Регистрационный номер ПИ № ФС77-78166

ИЗДАТЕЛЬ:

ООО «Эко-Вектор»

Адрес: Россия, 191181, г. Санкт-Петербург, Аптекарский переулок, д. 3, литера А, помещение 1Н

E-mail: info@eco-vector.com

WEB: https://eco-vector.com

РЕДАКЦИЯ:

Адрес: Россия, 163000, г. Архангельск, пр. Троицкий, д. 51.

Тел. +7 (818) 220 6563;

E-mail: he-office@eco-vector.com

ИНДЕКСАЦИЯ:

- SCOPUS
- Белый список (V1)
- Google Scholar
- Ulrich's Periodicals directory
- ядро РИНЦ
- Russian Science Citation Index
- Norwegian National Center for Research Data
- реферативный журнал и база данных ВИННИТИ
- Global Health
- CAB Abstracts
- ProQuest
- InfoBase Index
- КиберЛенинка

Оригинал-макет подготовлен в издательстве «Эко-Вектор».

Литературный редактор: И.Г. Шевченко

Корректор: И.Г. Шевченко

Вёрстка: О.В. Устинкова

Сдано в набор 14.10.2025.

Подписано в печать 21.11.2025.

Выход в свет 04.12.2025.

Формат 60 × 88½. Печать офсетная.

Заказ Цена свободная.

Усл. печ. л. 8,8.

Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Типография Экспресс В2В»

Россия, 191180, Санкт-Петербург, наб. реки

Фонтанки, д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1.

Тел.: +7 (812) 646 33 77

ПОДПИСКА:

<https://hum-ecol.ru/1728-0869/about/subscriptions>

OPEN ACCESS:

В электронном виде журнал распространяется бесплатно — в режиме немедленного открытого доступа.

ОТДЕЛ РЕКЛАМЫ:

Тел.: +7 (968) 545 78 20

E-mail: adv@eco-vector.com

Редакция не несёт ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются только статьи, подготовленные в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте: <https://hum-ecol.ru>



Экология человека. 2025. Т. 32, № 10.

ISSN 1728-0869 (Print)
ISSN 2949-1444 (Online)

ЭКОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА

Ежемесячный научный рецензируемый журнал

Том 32 • № 10 • 2025

Основными направлениями публикаций являются вопросы взаимодействия человека и окружающей среды, физиология человека, влияние экологических факторов на здоровье населения, гигиена, эпидемиология и общественное здоровье.

Журнал ориентирован на широкий круг научной общественности, практических врачей, экологов, биологов, социальных работников, работников сферы образования.

В журнале публикуются оригинальные статьи, обзоры и протоколы исследований.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Унгуряну Татьяна Николаевна, д-р мед. наук, доцент
Северный государственный медицинский университет
(Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0001-8936-7324

Заместители главного редактора

Гудков Андрей Борисович, д-р мед. наук, профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0001-5923-0941

Ушаков Игорь Борисович, д-р мед. наук, профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-0270-8622

Научный редактор

Марьяндышев Андрей Олегович, д-р мед. наук, профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-8485-5625

Ответственный секретарь

Постоев Виталий Александрович, канд. мед. наук (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0003-4982-4169



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Баранов Александр Васильевич, д.м.н.,
(Сыктывкар, Россия)
ORCID: 0000-0002-3553-9001

Болотов Иван Николаевич, д.б.н.,
профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-3878-4192

Бузинов Роман Вячеславович, д.м.н.,
доцент (Санкт-Петербург, Россия)
ORCID: 0000-0002-8624-6452

Горбатова Любовь Николаевна, д.м.н.,
профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0003-0675-3647

Доршакова Наталья Владимировна, д.м.н.,
профессор (Петрозаводск, Россия)
ORCID: 0000-0003-1072-9164

Зайцева Нина Владимировна, д.м.н.,
профессор (Пермь, Россия)
ORCID: 0000-0003-2356-1145

Ичитовкина Елена Геннадьевна, д.м.н.,
доцент (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-8876-669X

Макарова Валерия Ивановна, д.м.н.,
профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-8150-9110
Author ID: 7005797378

Мордовский Эдгар Артурович, д.м.н.,
доцент (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-2346-9763

Мосягин Игорь Геннадьевич, д.м.н.,
профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-9485-6584

Соловьев Андрей Горгоньевич, д.м.н.,
профессор (Архангельск, Россия)
ORCID: 0000-0002-0350-1359

Софронов Генрих Александрович, д.м.н.,
профессор (Санкт-Петербург, Россия)
ORCID: 0000-0002-8587-1328

Черешнев Валерий Александрович, д.м.н.,
профессор (Екатеринбург, Россия)
ORCID: 0000-0003-4329-147X

Rautio Arja, профессор (Финляндия)
ORCID: 0000-0002-5816-533X

Rudge Marilza Vieira Cunha, профессор
(Бразилия)
ORCID: 0000-0002-9227-832X

Nieboer Evert, профессор (Канада)
ORCID: 0000-0001-5165-2832

Röllin Halina, профессор (ЮАР)
ORCID: 0000-0001-5247-6519

Ruiz Jonatan, профессор (Испания)
ORCID: 0000-0002-7548-7138

Ramune Kalediene, профессор (Литва)
ORCID: 0000-0003-3434-8091

Pärna Kersti, доцент (Эстония)
ORCID: 0000-0001-7677-9493

Per Magnus, профессор (Норвегия)
ORCID: 0000-0002-6427-4735

Gissler Mika, профессор (Финляндия)
ORCID: 0000-0001-8254-7525

Weihe Pal, профессор (Фарерские острова)
ORCID: 0000-0001-8174-3671

Johnson Rhonda, профессор (США)
ORCID: 0000-0002-7730-7452

Shi Zumin, профессор (Катар)
ORCID: 0000-0002-3099-3299

Yu Canqing, профессор (КНР)
ORCID: 0000-0002-0019-0014

FOUNDERS:

- Northern State Medical University;
- Eco-Vector

PUBLISHER:

Eco-Vector

Address: 3 liter A, 1H, Aptekarsky pereulok,
191181 Saint Petersburg, Russia

E-mail: info@eco-vector.com

WEB: <https://eco-vector.com>

EDITORIAL OFFICE:

Address: 51 Troitsky Ave., Arkhangelsk 163000,
Russia

E-mail: he-office@eco-vector.com

Phone: +7 (818) 2206563

PUBLICATION ETHICS

Journal's ethic policies are based on:

- ICMJE
- COPE
- ORE
- CSE
- EASE

OPEN ACCESS:

Immediate Open Access is mandatory
for all published articles

INDEXATION:

- SCOPUS
- RUS White list
- Google Scholar
- Ulrich's Periodicals directory
- Russian Science Citation Index
- Norwegian National Center for Research Data
- Global Health
- CAB Abstracts
- ProQuest
- InfoBase Index

TYPESET:

completed in Eco-Vector

Copyeditor: I.G. Shevchenko

Proofreader: I.G. Shevchenko

Layout editor: O.V. Ustinkova

SUBSCRIPTION:

[https://hum-ecol.ru/1728-0869/about/
subscriptions](https://hum-ecol.ru/1728-0869/about/subscriptions)

ADVERTISEMENT DEPARTMENT:

Phone: +7 (968) 545 78 20

E-mail: adv@eco-vector.com

The editors are not responsible for the content of
advertising materials. The point of view of the authors
may not coincide with the opinion of the editors. Only
articles prepared in accordance with the guidelines
are accepted for publication. By sending the article to
the editor, the authors accept the terms of the public
offer agreement. The guidelines for authors and the
public offer agreement can be found on the website:
<https://hum-ecol.ru>.

ISSN 1728-0869 (Print)

ISSN 2949-1444 (Online)

EKOLOGIYA

C H E L O V E K A (H U M A N E C O L O G Y)

Monthly peer-reviewed journal

Volume 32 • Issue 10 • 2025

The journal publishes results of research in environmental health, human
physiology, human ecology, hygiene, epidemiology and public health.

The primary audience of the journal includes health professionals,
environmental specialists, biomedical researchers, biologists,
social workers and university teachers.

The journal publishes original articles and reviews.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Tatiana N. Unguryanu, MD, Dr. Sci. (Med), Professor associate

North State Medical University (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0001-8936-7324

Deputy Editor-in-Chief

Andrey B. Gudkov, MD, Dr. Sci. (Med), Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0001-5923-0941

Igor B. Ushakov, MD, Dr. Sci. (Med), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-0270-8622

Science editor

Andrey O. Maryandyshev, MD, Dr. Sci. (Med), Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-8485-5625

Executive editor

Vitaly A. Postoev, MD, Cand. Sci. (Med) (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0003-4982-4169

EDITORIAL COUNCIL

Alexander V. Baranov,

MD, Dr. Sci. (Med), (Syktyvkar, Russia)
ORCID: 0000-0002-3553-9001

Ivan N. Bolotov, Dr. Sci. (Biol), Professor

(Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-3878-4192

Roman V. Buzinov, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor associate (St. Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-8624-6452

Valeriy A. Chereshev, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Ekaterinburg, Russia)

ORCID: 0000-0003-4329-147X

Nataliya V. Dorshakova, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Petrozavodsk, Russia)

ORCID: 0000-0003-1072-9164

Mika Gissler, Professor (Finland)

ORCID: 0000-0001-8254-7525

Lyubov N. Gorbatova, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0003-0675-3647

Elena G. Ichitovkina, MD, Dr. Sci. (Med),

Associate Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-8876-669X

Rhonda Johnson, Professor (USA)

ORCID: 0000-0002-7730-7452

Valeriya I. Makarova, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-8150-9110

Scopus Author ID: 7005797378

Edgar A. Mordovsky, MD, Dr. Sci. (Med),

Associate Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-2346-9763

Igor G. Mosyagin, MD, Dr. Sci. (Med), Professor

(Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-9485-6584

Evert Nieboer, Professor (Canada)

ORCID: 0000-0001-5165-2832

Kersti Pärna, Professor associate (Estonia)

ORCID: 0000-0001-7677-9493

Magnus Per, Professor (Norway)

ORCID: 0000-0002-6427-4735

Kalediene Ramune, Professor (Lithuania)

ORCID: 0000-0003-3434-8091

Arja Rautio, Professor (Finland)

ORCID: 0000-0002-5816-533X

Halina Röllin, Professor (South Africa)

ORCID: 0000-0001-5247-6519

Marilza Vieira Cunha Rudge,

Professor (Brazil)

ORCID: 0000-0002-9227-832X

Jonatan Ruiz, Professor (Spain)

ORCID: 0000-0002-7548-7138

Zumin Shi, Professor (Qatar)

ORCID: 0000-0002-3099-3299

Genrikh A. Sofronov, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (St. Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-8587-1328

Andrey G. Soloviev, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Arkhangelsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-0350-1359

Pal Weihe, Professor (Faroe Islands)

ORCID: 0000-0001-8174-3671

Canqing Yu, Professor (China)

ORCID: 0000-0002-0019-0014

Nina V. Zaytseva, MD, Dr. Sci. (Med),

Professor (Perm, Russia)

ORCID: 0000-0003-2356-1145

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

О.С. Чемисова, Д.А. Седова, С.Н. Головин, А.М. Ермаков

Экспериментальное моделирование дисбактериоза детского кишечника с применением биореакторной системы искусственного желудочно-кишечного тракта..... 694

Ю.А. Тунакова, Р.И. Файзуллин, В.С. Валиев

Активность процессов перекисного окисления липидов и содержание металлов в сыворотке крови детей пубертатного возраста, проживающих на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки..... 705

С.А. Царева, Е.Г. Лилеева, Ю.В. Царев, Н.С. Дыбулина, С.Ф. Велиметова

Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Череповце по данным дистанционного зондирования Земли..... 714

Е.В. Болотова, В.В. Оноприев, Л.В. Батракова, А.Г. Абраменко, И.Г. Павельев

Взаимосвязь между уровнем множественной химической чувствительности и выраженностью симптомов токсической нагрузки..... 723

Н.А. Каратыгин, И.И. Коробейникова, М.А. Цыганова, Я.А. Венерина, Т.Д. Джебраилова

Влияние оптической стимуляции с частотами альфа-диапазона электроэнцефалограммы на параметры сенсомоторной деятельности человека..... 735

В.Б. Никишина, Е.А. Петраш, А.А. Лисичкина, И.А. Кучерявенко

Взаимосвязь субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте..... 745

CONTENTS

ORIGINAL STUDY ARTICLES

<i>Olga S. Chemisova, Darya A. Sedova, Sergey N. Golovin, Alexey M. Ermakov</i> Experimental Modeling of Pediatric Intestinal Dysbiosis Using an Artificial Gastrointestinal Tract Bioreactor System	694
<i>Yulia A. Tunakova, Rashat I. Faizullin, Vsevolod S. Valiev</i> Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Lipid Peroxidation and Serum Metal Levels in Adolescents in Regions With Various Degrees of Man-Induced Load.....	705
<i>Sophia A. Tsareva, Elena G. Lileeva, Yuri V. Tsarev, Nataliya S. Dybulina, Sabrina F. Velimetova</i> Atmospheric Pollution in Cherepovets According to Remote Sensing	714
<i>Elena V. Bolotova, Vladimir V. Onopriev, Lubov V. Batrakova, Arina G. Abramenko, Igor G. Paveliev</i> Association Between Multiple Chemical Sensitivity and Toxic Load Symptom Severity.....	723
<i>Nikolay A. Karatygin, Irina I. Korobeinikova, Margarita A. Tsyganova, Yana A. Venerina, Tamara D. Dzhebrailova</i> Effect of Alpha-Frequency Optical Stimulation on Sensorimotor Parameters in Humans	735
<i>Vera B. Nikishina, Ekaterina A. Petrash, Alyona A. Lisichkina, Igor A. Kucheryavenko</i> Association Between Subjective Credulity Assessment and Judging Deception in Older Adults	745

Экспериментальное моделирование дисбактериоза детского кишечника с применением биореакторной системы искусственного желудочно-кишечного тракта

О.С. Чемисова, Д.А. Седова, С.Н. Головин, А.М. Ермаков

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Традиционные методы культивирования микроорганизмов не позволяют воспроизвести сложные меж-микробные взаимодействия, характерные для кишечного биоценоза *in vivo*. В связи с этим актуальны разработка и применение современных биореакторных систем для экспериментального моделирования дисбактериоза кишечника у детей, которые обеспечат стандартизацию условий эксперимента и воспроизводимость результатов без этических ограничений.

Цель. Разработка и валидация методики экспериментального моделирования дисбактериоза детского кишечника с использованием биореакторной системы искусственного желудочно-кишечного тракта для изучения патогенетических механизмов нарушений микробиоценоза и оценки эффективности корректирующих воздействий.

Методы. Исследование проводили с использованием автоматизированной системы моделирования желудочно-кишечного тракта, включающей три реактора (желудок, двенадцатиперстная кишка, толстая кишка) с контролируемыми параметрами температуры, pH и анаэробных условий. Исследование проведено с использованием образца фекалий от донора 6 лет. Период наблюдения составлял 35 дней после внесения фекальной суспензии в реакторы. Критериями валидации были соответствие микробного профиля искусственного микробиоценоза клиническому профилю исходного образца и стабильность микробного сообщества по ключевым таксонам. Методы оценки включали бактериологическое исследование на селективных средах и количественную ПЦР с использованием набора «Колонофлор-16». Критерием стабильности устанавливали коэффициент вариации $\leq 20\%$ для основных бактериальных популяций.

Результаты. В исходном образце фекалий методами ПЦР и бактериологическим исследованием выявлены критический дефицит облигатной микрофлоры (снижение количества лактобактерий и бифидобактерий) и избыточный рост условно-патогенных микроорганизмов, что соответствует дисбактериозу III степени. Разработанная биореакторная модель успешно воспроизвела дисбиотические изменения. Общая бактериальная масса в реакторе толстой кишки составила $13,21 \pm 0,20$ lg копий ДНК/мл на 8-й день и $13,38 \pm 0,09$ lg копий ДНК/мл на 35-й день при исходном значении $13,30$ lg копий ДНК/мл. Созданная модель обеспечивает воспроизведение основных характеристик детского дисбактериоза, включая дефицит облигатной микрофлоры (*Lactobacillus* spp. и *Bifidobacterium* spp.) и избыточный рост условно-патогенных микроорганизмов (*E. coli*, *C. perfringens*, *Enterobacter* spp. и др.). Анализ стабильности показал достижение коэффициентов вариации менее 20% для всех ключевых популяций со второй недели культивирования. Модель обеспечила стабильное воспроизведение дисбактериоза III степени в течение 35-дневного периода наблюдения.

Заключение. В ходе исследования успешно разработана и валидирована методика экспериментального моделирования дисбактериоза детского кишечника с использованием системы искусственного желудочно-кишечного тракта. Разработанная модель открывает новые возможности для углублённого изучения патогенетических механизмов нарушений микробиоценоза в детском возрасте, скрининга и оценки эффективности пробиотических препаратов, пребиотиков и других корректирующих воздействий в условиях, приближенных к физиологическим.

Ключевые слова: дисбактериоз; микробиота; искусственный желудочно-кишечный тракт; модель кишечника; детский возраст.

Как цитировать:

Чемисова О.С., Седова Д.А., Головин С.Н., Ермаков А.М. Экспериментальное моделирование дисбактериоза детского кишечника с применением биореакторной системы искусственного желудочно-кишечного тракта // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 694–704. DOI: 10.17816/humeco690049 EDN: MTJMUA

Experimental Modeling of Pediatric Intestinal Dysbiosis Using an Artificial Gastrointestinal Tract Bioreactor System

Olga S. Chemisova, Darya A. Sedova, Sergey N. Golovin, Alexey M. Ermakov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Traditional microbial culture methods cannot replicate the complex intermicrobial interactions characteristic of the intestinal microbiota in vivo. Therefore, the development and use of modern bioreactor systems for experimental modeling of pediatric intestinal dysbiosis are relevant, as they ensure standardized experimental conditions and reproducibility of results without ethical limitations.

AIM: The study aimed to develop and validate a method for experimental modeling of pediatric intestinal dysbiosis using an artificial gastrointestinal tract bioreactor system to study the pathogenic mechanisms of microbiota imbalance and assess the efficacy of corrective interventions.

METHODS: The study was performed using an automated gastrointestinal tract modeling system consisting of three reactors (stomach, duodenum, colon) with controlled temperature, pH, and anaerobic conditions. A stool sample from a six-year-old donor was used. The observation period was 35 days following fecal suspension inoculation into the reactors. Validation criteria included the correspondence between the microbial profile of the artificial microbiota and the clinical profile of the initial sample, and stability of the microbial consortium by key taxa. Evaluation methods included bacteriological culture on selective media and quantitative polymerase chain reaction using the Kolonoflor-16 panel. A coefficient of variation $\leq 20\%$ for major bacterial populations was established as the stability criterion.

RESULTS: Polymerase chain reaction and bacteriological testing of the initial stool sample revealed a critical deficiency of obligate microbiota (reduced lactobacilli and bifidobacteria) and excessive growth of opportunistic microorganisms, consistent with grade III dysbiosis. The developed bioreactor model successfully reproduced dysbiotic alterations. The total bacterial mass in the colon reactor was 13.21 ± 0.20 log DNA copies/mL on day 8 and 13.38 ± 0.09 log DNA copies/mL on day 35 with baseline 13.30 log DNA copies/mL. The model reproduced the key characteristics of pediatric dysbiosis, including obligate microbiota deficiency (*Lactobacillus* spp., *Bifidobacterium* spp.) and overgrowth of opportunistic microorganisms (*E. coli*, *C. perfringens*, *Enterobacter* spp., etc.). Stability analysis demonstrated coefficients of variation $< 20\%$ for all key bacterial populations starting from week 2 of cultivation. The model ensured stable reproduction of grade III intestinal dysbiosis throughout the 35-day observation period.

CONCLUSION: A method for experimental modeling of pediatric intestinal dysbiosis using an artificial gastrointestinal tract system has been successfully developed and validated. This model provides new opportunities for in-depth study of pathogenetic mechanisms of microbiota disturbances in childhood, as well as for screening and evaluating the efficacy of probiotics, prebiotics, and other corrective interventions under conditions approximating physiological ones.

Keywords: dysbiosis; microbiota; artificial gastrointestinal tract; intestinal model; pediatrics.

To cite this article:

Chemisova OS, Sedova DA, Golovin SN, Ermakov AM. Experimental Modeling of Pediatric Intestinal Dysbiosis Using an Artificial Gastrointestinal Tract Bioreactor System. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):694–704. DOI: 10.17816/humeco690049 EDN: MTJMUA

使用人工胃肠道生物反应器系统实验建模儿童肠道菌群失调

Olga S. Chemisova, Darya A. Sedova, Sergey N. Golovin, Alexey M. Ermakov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

摘要

论证。传统微生物培养方法无法再现体内肠道微生态中复杂的微生物间相互作用。因此，开发可用于儿童肠道菌群失调实验建模的现代生物反应器系统具有重要意义，可在无伦理限制条件下实现实验条件标准化与结果再现性。

目的。开发并验证一种基于人工胃肠道生物反应器系统的儿童肠道菌群失调实验建模方法，用于研究微生态紊乱的发病机制并评估干预措施的有效性。

方法。使用自动化人工胃肠道模拟系统，包括三个反应器（胃、十二指肠、结肠），并可精确控制温度、pH及厌氧条件。研究使用1例6岁儿童的粪便样本。观察期自将粪便悬液加入反应器后持续35天。验证标准为人工微生态的微生物谱与原始样本的临床微生物谱一致，以及关键菌群的稳定性。评价方法包括选择性培养与基于“Kolonoflor-16”试剂盒的定量PCR。主要菌群变异系数 $\leq 20\%$ 被设定为稳定性判定标准。

结果。原始粪便样本PCR与细菌学分析显示：存在明显优势菌群缺乏（乳酸杆菌及双歧杆菌减少）及条件致病菌过度生长，符合III级肠道菌群失调特征。所建立的生物反应器模型成功再现了这种肠道菌群失调变化。结肠反应器总菌量在第8天为 $13.21 \pm 0.20 \lg \text{ DNA copies/ml}$ ，第35天为 $13.38 \pm 0.09 \lg \text{ DNA copies/ml}$ ，基线为 $13.30 \lg \text{ DNA copies/ml}$ 。模型再现儿童肠道菌群失调主要特征：优势菌群减少（*Lactobacillus* spp., *Bifidobacterium* spp.）及条件致病菌增加（*E. coli*, *C. perfringens*, *Enterobacter* spp.）。自培养第2周起，各关键菌群的变异系数均低于20%。模型在35天观察期内能够稳定再现III级肠道菌群失调。

结论。成功建立并验证了基于人工胃肠道系统的儿童肠道菌群失调实验建模方法。该模型为深入研究儿童肠道微生态紊乱的发病机制，以及在接近生理条件下开展益生菌、益生元及其他纠正性干预措施的筛选与疗效评估提供了新的可能。

关键词：肠道菌群失调；微生物群系；人工胃肠道；肠道模型；儿童。

引用本文：

Chemisova OS, Sedova DA, Golovin SN, Ermakov AM. 使用人工胃肠道生物反应器系统实验建模儿童肠道菌群失调. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):694–704. DOI: 10.17816/humeco690049 EDN: MTJMUA

ОБОСНОВАНИЕ

Желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) человека представляет собой сложную экологическую систему, включающую огромное разнообразие микроорганизмов с общим количеством более 10^{13} клеток [1]. Эта микробная экосистема играет ключевую роль в поддержании гомеостаза хозяина, участвуя в процессах пищеварения, синтезе витаминов, модуляции иммунного ответа и защите от патогенов. В последние десятилетия благодаря метагеномным исследованиям значительно расширились представления о структуре и видовом составе кишечной микробиоты, включающей около 2000 видов бактерий, значительная часть которых является некультивируемой. Доминирующими таксонами в составе микробиоценоза кишечника являются филумы *Firmicutes* (в современной номенклатуре *Bacillota*), *Actinobacteria* (*Actinomycetota*) и *Bacteroidetes* (*Bacteroidota*), составляющие до 90% от общего микробного сообщества. К числу субдоминантных филумов относятся *Proteobacteria* (*Pseudomonadota*), *Tenericutes* (*Mollicutes*), *Fusobacteria* (*Fusobacteriota*) и *Verrucomicrobia* (*Verrucomicrobiota*) [2, 3].

Формирование кишечной микрофлоры у детей происходит поэтапно, начиная с момента рождения, и характеризуется высокой динамичностью и чувствительностью к внешним воздействиям. На этот процесс влияют такие факторы, как способ родоразрешения, тип вскармливания, применение антибиотиков и особенности диеты [4]. Изменения микробного состава кишечника у детей связаны с возникновением болезней пищеварительной системы, а также различных инфекционных и неинфекционных заболеваний, включая патологии других органов и систем организма [5]. Нарушения микробиоценоза кишечника у детей могут приводить к развитию различных воспалительных заболеваний, функциональных расстройств пищеварения, диабета 1-го типа, аллергических заболеваний, снижению иммунной защиты и изменениям в развитии нервной системы [6–8].

Дисбактериоз (дисбиоз) кишечника представляет собой клинко-лабораторный синдром, развивающийся на фоне ряда болезней, характеризующийся изменением качественного и/или количественного состава нормальной микрофлоры, метаболическими и иммунными нарушениями, которые сопровождаются у части пациентов клиническими проявлениями поражения кишечника. Дисбактериоз может быть связан с нарушением равновесия различных групп микроорганизмов, населяющих кишечник в норме: бактерий, грибов, вирусов, простейших или их комплекса [9].

Изучение патогенетических механизмов развития дисбактериоза кишечника у детей представляет значительные трудности в связи с этическими ограничениями проведения инвазивных исследований, сложностью получения биологического материала и высокой вариабельностью состава микрофлоры. Традиционные методы

культивирования микроорганизмов не позволяют воспроизвести сложные межмикробные взаимодействия, характерные для кишечного биоценоза *in vivo*. Кроме того, методы культивирования не обеспечивают адекватного моделирования физико-химических условий различных отделов ЖКТ, включая градиенты pH, кислорода, питательных веществ и времени транзита. В совокупности это затрудняет прямую валидацию гипотез *in vivo* и требует развитых *in vitro* моделей. В связи с этим особую актуальность приобретают разработка и применение современных биореакторных систем для экспериментального моделирования дисбактериоза кишечника.

Современные *in vitro* модели кишечного микробиома, такие как симулятор человеческой кишечной микробной экосистемы (англ. Simulator of Human Intestinal Microbial Ecosystem, SHIME) и модули взаимодействия хозяин–микробиота (англ. Host-Microbiota Interaction, HMI), позволяют воспроизводить физиологические условия различных отделов ЖКТ с высокой степенью точности [10, 11]. В Донском государственном техническом университете ранее был разработан микробиологический комплекс моделирования процессов в ЖКТ животных — программно-аппаратный комплекс, эквивалентный моделям искусственного кишечника SHIME и HMI (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3559948/>). Биореакторные модели обеспечивают контролируемые условия для изучения динамики микробных сообществ, их метаболической активности и ответа на различные терапевтические воздействия. Преимуществом таких систем является возможность стандартизации условий эксперимента и воспроизводимости результатов, что критически важно для получения достоверных научных данных [12, 13]. Особое значение биореакторные системы приобретают при моделировании детского кишечного микробиома, поскольку позволяют учесть специфические особенности микробиоты детей различных возрастных групп и исследовать механизмы развития дисбактериоза без этических ограничений.

Цель исследования. Разработка и валидация методики экспериментального моделирования дисбактериоза детского кишечника с использованием биореакторной системы искусственного ЖКТ для изучения патогенетических механизмов нарушений микробиоценоза и оценки эффективности корректирующих воздействий.

МЕТОДЫ

Условия проведения исследования

Исследование проводили с использованием автоматизированной системы «Микробиологический комплекс моделирования процессов в желудочно-кишечном тракте» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3559948/>), адаптировав её параметры к поставленным задачам исследования. В работе использовали три реактора, имитирующие желудок, двенадцатиперстную кишку (ДПК), толстую кишку (ТК).

Реакторы соединены перистальтическими насосами с клапанами для контролируемой перекачки содержимого, снабжены датчиками температуры, pH, магнитными мешалками. Каждый реактор оборудован отверстиями для внесения компонентов (питательной среды, искусственного желудочного сока, химуса, растворов соляной кислоты и щёлочи) и для отбора проб. Полезный объём реакторов следующий: желудок — 50 мл, ДПК — 200 мл, ТК — 300 мл. Система автоматически поддерживает постоянную температуру 37 °С, анаэробные условия путём подачи инертного газа (азота), pH содержимого реактора-желудка на уровне 3,0, реактора-ДПК — 6,5–6,8, реактора-ТК — 6,8–7,0 (за счёт дозированного поступления растворов 0,5 М HCl и 1 М NaHCO₃).

Для создания модели микробиоценоза использовали образцы кала от ребёнка 6 лет с установленным по микробиологическим критериям дисбактериозом III степени (значительное снижение титров *Bifidobacterium* spp. и *Lactobacillus* spp., обнаружение в анализе условно-патогенных микроорганизмов в высоких титрах как одного вида, так и в ассоциациях). Сбор биоматериала проводили в соответствии с требованиями п. 6.8.3. МУ 4.2.2039-05 «Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Техника сбора и транспортирования биоматериалов в микробиологические лаборатории. Методические указания». Отбор фекалий производили в стерильную посуду, материал исследовали бактериологическим методом в течение 2 ч после получения образца. Для подготовки фекальной взвеси, вносимой в реакторы, биологический материал гомогенизировали в стерильном искусственном химусе в соотношении 1:10, фильтровали через нейлоновый фильтр с диаметром пор 150 мкм, определяли методом количественной полимеразной цепной реакции (ПЦР) общую бактериальную массу в копиях ДНК/мл, что принимали за эквивалент КОЕ/мл. Фекальную взвесь вносили однократно в начале эксперимента в реакторы в концентрации, соответствующей физиологическим значениям для имитированных отделов кишечника [14], рассчитанных исходя из исходной концентрации бактерий в фекальной суспензии и объёма соответствующего реактора: в реактор-ДПК до количества *Escherichia coli* 10² КОЕ/мл (2 lg КОЕ/мл), в реактор-ТК — до количества общей бактериальной массы 10¹² КОЕ/мл (12 lg КОЕ/мл).

Для имитации желудочного сока и кишечного химуса использовали концентрации ферментов и жёлчных солей в соответствии с рекомендациями INFOGEST [15]. Состав искусственного желудочного сока: 50 мМ NaCl, пепсин свиной сывороточный (2000 У/мл). К полученному раствору добавляли 0,5 М HCl до достижения значения pH 3,0. Приготовленный раствор стерилизовали фильтрацией через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм (Biofil, Китай). Экспозиция в реакторе желудка составляла 120 мин, после чего весь объём перекачивался в реактор-ДПК один раз в сутки.

В качестве основы искусственного дуоденального химуса использовали 1% мясоептонный бульон с добавлением 0,5% лактозы, который обеспечивал необходимое содержание аминокислот и пептидов, характерное для частично переваренной белковой пищи в тонком кишечнике. Ферментативная активность искусственного химуса достигалась путём добавления панкреатина свиного (CDH, Индия) с нормированной липазной активностью 2000 У/мл. В качестве компонентов жёлчи добавляли таурохолат натрия 1,5 мг/мл. Физиологический уровень pH 6,5–6,8 искусственного химуса поддерживали введением 1 М раствора гидрокарбоната натрия. Скорость перекачки содержимого реактора-ДПК в реактор-ТК составляла 20–22 мл каждые 4 ч, объём в реакторе-ДПК поддерживался постоянным за счёт периодического добавления свежего искусственного дуоденального химуса.

Для предотвращения влияния остаточной жёлчи/ферментов и обеспечения роста анаэробных консорциумов в реакторе-ТК после перекачки содержимого из реактора-ДПК вводили до достижения заданных параметров буферную среду: 100 мМ NaCl, 5 мМ K₂HPO₄, 5 мМ KH₂PO₄, 100 мМ NaHCO₃, 0,5 мМ MgCl₂, 1,5 мМ CaCl₂, 0,05% L-цистеин-HCl, pH 6,8–7,0. Каждые 24 ч проводили сброс до 50–60% от объёма содержимого ТК, объём в реакторе-ДПК поддерживался за счёт перекачки содержимого из ДПК и введения буферной среды.

Отбор образцов из реакторов ДПК и ТК проводили один раз в сутки перед этапом перекачки. Для микробиологического исследования готовили десятикратные разведения образцов в тиогликолевом буфере от 10⁻¹ до 10⁻⁸. Из разведений производили высевы по 0,1 мл на соответствующие агаризованные среды и по 1,0 мл в высокий столбик на среды для определения бифидобактерий и клостридий. Посев материала производили на универсальные и дифференциально-диагностические среды: ГРМ-агар, Бифидум-среда, MRS-агар, агар Эндо, Колумбийский агар, Стафилококкагар, среда Вильсон-Блера производства (ФБУН ГНЦ ПМБ, Россия). Посевы инкубировали при +37 °С. Степени дисбиотических изменений определяли согласно ОСТ 91500.11.0004-2003 «Протокол ведения больных. Дисбактериоз кишечника».

Качественный и количественный анализ микробиоценоза биоматериала от донора и образцов из искусственного ЖКТ проводили методом ПЦР в режиме реального времени с использованием набора реагентов «Колонофлор-16 (премиум)» (АльфаЛаб», Россия). Набор реагентов предназначен для выявления ДНК облигатных представителей микрофлоры ТК (бифидобактерий, лактобацилл, кишечной палочки), а также условно-патогенных и патогенных микроорганизмов. Выделение ДНК осуществляли с помощью набора ДНК-сорб-В (ФБУН ЦНИИ Эпидемиологии, Россия). Постановку ПЦР проводили в соответствии с инструкцией производителя (<https://alphalabs.ru/produkcziya/test-sistemyi-dlya-issledovaniya-sostava>

mikrobioty-i-tolstogo-kishechnika/) на амплификаторе де-тектирующем ДТ-96 (ДНК-Технология, Россия).

После внесения биологического материала в виде фекальной суспензии донора в реакторы ДПК и ТК в течение 35 дней (период наблюдения) оценивали стабильность микробиоценоза, контролируя показатели бактериологическим методом и количественной ПЦР. Критериями валидации искусственного ЖКТ считали соответствие микробного профиля искусственного микробиоценоза клиническому профилю исходного образца и стабильность сформированного микробного сообщества в течение периода наблюдения по ключевым таксонам.

Исследование проводили с соблюдением принципов биомедицинской этики с получением информированного согласия законных представителей ребёнка. Проведение исследования одобрено локальным независимым этическим комитетом ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (протокол № 26 от 17.09.2024). Исследование проводили в период с декабря 2024 г. по март 2025 г.

Статистические методы

Для статистических расчётов использовали пакет прикладных программ Microsoft Excel 2010, IBM SPSS Statistics 26.0. Микробиологические данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения. Для определения периода стабилизации микробного сообщества анализировали динамику изменений численности основных бактериальных популяций в течение 35 дней культивирования. Коэффициент вариации (CV) рассчитывали по формуле: $CV = (\sigma/\mu) \times 100\%$, где σ — стандартное отклонение; μ — среднее арифметическое значение. Порог в 20% изменчивости или 80% сходства был установлен в качестве критерия стабильности [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа образца faeces от донора в ПЦР и бактериологическим методом выявлены значительные нарушения качественного и количественного состава микрофлоры, соответствующие дисбактериозу III степени, характеризующиеся критическим дефицитом облигатной микрофлоры и избыточным ростом условно-патогенных микроорганизмов. Общая бактериальная масса в ПЦР превысила верхнюю границу референсного интервала, указывая на избыточный бактериальный рост в ТК (табл. 1). Бактериологическое исследование также подтвердило высокую общую микробную нагрузку 12 lg КОЕ/мл.

Среди облигатной микрофлоры отмечено снижение популяций лактобактерий на 1,15–2,15 lg ниже референсных значений и бифидобактерий до 7,60 lg копий ДНК/мл, что соответствует 25-кратному снижению относительно нижней границы нормы. Результаты бактериологического исследования подтвердили дефицит лактобактерий — на MRS-агаре выявлено только 5,78 lg КОЕ/мл. При этом

культуральное исследование на Бифидум-среде показало ещё более выраженное снижение количества бифидобактерий (до 6 lg КОЕ/мл), что объясняется возможностью выявления молекулярно-генетическими методами ДНК погибших бактериальных клеток.

Наиболее критичным являлось превышение содержания условно-патогенных микроорганизмов. Выявление *Citrobacter* spp. в концентрации 12,48 lg копий ДНК/мл, что превышает референсные значения более чем в 10^8 раз, свидетельствует о массивной колонизации кишечника условно-патогенными энтеробактериями. Также зарегистрировано превышение нормальных значений для *Akkermansia muciniphila* (12,30 lg копий ДНК/мл при норме не более 11 lg копий ДНК/мл) и незначительное повышение содержания стрептококков (6×10^8 КОЕ/г при норме не более 10^8 КОЕ/г), *Acinetobacter* spp. (6,60 lg копий ДНК/мл при норме не более 6 lg копий ДНК/мл) и *Streptococcus* spp. (8,78 lg копий ДНК/мл при допустимом уровне не более 8 lg копий ДНК/мл). Патогенные микроорганизмы (*Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Clostridium difficile*, *Clostridium perfringens*, энтеропатогенная *E. coli*) не обнаружены. Однако культуральное исследование на среде Вильсона–Блера показало наличие сульфитредуцирующих клостридий в количестве 5 lg КОЕ/мл, что также является признаком дисбиотических нарушений.

Комплексное исследование позволило охарактеризовать выраженные нарушения микробиоты кишечника донора и определить показатели для контроля формирования модели дисбактериоза ЖКТ в нашем эксперименте. Внесение подготовленной фекальной взвеси в биореакторную систему проводилось с учётом физиологических градиентов микробной обсеменённости различных отделов ЖКТ. В качестве индикаторного микроорганизма, позволяющего оценить динамику изменений в искусственной модели ДПК при длительном непрерывном культивировании, был выбран вид *E. coli*, в реакторе-ДПК была достигнута целевая концентрация *E. coli* 2 lg КОЕ/мл, что соответствует уровню бактериальной обсеменённости тонкого кишечника. В реакторе-ТК общая бактериальная масса составила 12 lg копий ДНК/мл, моделируя высокую концентрацию микроорганизмов, характерную для ТК.

Сравнительный анализ микробного профиля модели ТК с исходным образцом продемонстрировал высокую степень воспроизводимости ключевых характеристик дисбактериоза III степени на протяжении 35-дневного периода наблюдения (см. табл. 1). Выбраны две контрольные точки для сопоставления модели дисбактериоза в реакторе-ТК с исходным образцом и референсными значениями — 8-й день культивирования в реакторе после периода адаптации бактерий к искусственной системе и 35-й день по окончании наблюдения. В результате определения общей бактериальной массы показано поддержание исходного уровня: $13,21 \pm 0,20$ lg копий ДНК/мл на 8-й день и $13,38 \pm 0,09$ lg копий ДНК/мл на 35-й день практически соответствовали исходному значению 13,30 lg

Таблица 1. Показатели микробиоценоза образца faeces и модели толстой кишки по результатам ПЦР**Table 1.** Microbiota profile of the fecal sample and colon reactor model based on polymerase chain reaction results

Показатель	Референсные значения, lg копий ДНК/мл	Образец faeces, lg копий ДНК/мл	Реактор толстой кишки, lg копий ДНК/мл (среднее ± SD) на 8-й день	Реактор толстой кишки, lg копий ДНК/мл (среднее ± SD) на 35-й день
Общая бактериальная масса	11–13	13,30	13,21±0,20	13,38±0,09
<i>Lactobacillus</i> spp.	7–8	5,85	5,32±0,15	4,30±0,07
<i>Bifidobacterium</i> spp.	9–10	7,60	7,86±0,08	7,90±0,01
<i>Escherichia coli</i>	6–8	7,90	8,90±0,03	11,89±0,17
<i>Bacteroides</i> spp.	9–12	13,30	13,14±0,11	13,25±0,03
<i>F. prausnitzii</i>	8–11	12,30	11,39±0,02	11,38±0,01
<i>Bacteroides thetaomicon</i>	Допустимо любое количество	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>A. muciniphila</i>	Не более 11	12,30	11,89±0,11	12,22±0,01
<i>Enterococcus</i> spp.	Не более 8	6,60	6,82±0,29	7,03±0,15
<i>C. perfringens</i>	Не обнаружено	Не обнаружено	10,47±0,03	5,26±0,14
<i>Proteus vulgaris/mirabilis</i>	Не более 4	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Citrobacter</i> spp.	Не более 4	12,48	8,92±0,03	7,79±0,02
<i>Enterobacter</i> spp.	Не более 4	Не обнаружено	4,34±0,15	4,61±0,03
<i>Fusobacterium nucleatum</i>	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Parvimonas micra</i>	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Blautia</i> spp.	8–11	8,48	8,86±0,23	9,44±0,13
<i>Acinetobacter</i> spp.	Не более 6	6,60	7,17±0,10	7,85±0,11
<i>Streptococcus</i> spp.	Не более 8	8,78	8,69±0,10	8,97±0,06
<i>Eubacterium rectale</i>	8–11	10,00	9,56±0,90	9,85±0,06
<i>Roseburia inulinivorans</i>	8–10	8,90	8,23±0,04	8,37±0,07
<i>Prevotella</i> spp.	Не более 11	8,00	8,34±0,11	9,27±0,12
<i>Methanobrevibacter smithii</i>	Не более 10	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Methanosphaera stadtmanae</i>	Не более 6	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Ruminococcus</i> spp.	Не более 11	9,30	9,06±0,19	8,97±0,170
<i>Bacteroides</i> spp./ <i>F. prausnitzii</i> (рассчитано для КОЕ/мл)	0,01–100,00	10,00	72,70	83,30

копий ДНК/мл, что свидетельствовало о сохранении общей биомассы микроорганизмов в биореакторной системе.

При исследовании количества основных представителей облигатной микрофлоры выявлены изменения, характерные для исходного образца faeces: значительное снижение относительно референсных значений количества *Bifidobacterium* spp. с незначительными колебаниями от 7,86±0,08 lg копий ДНК/мл на 8-й день до 7,90±0,01 lg копий ДНК/мл на 35-й день, *Lactobacillus* spp. — от 5,32±0,15 lg копий ДНК/мл до 4,30±0,07 lg копий ДНК/мл соответственно.

Для основных представителей анаэробной микрофлоры ТК *Bacteroides* spp. и *Faecalibacterium prausnitzii* показано превышение верхней границы референсных значений при сохранении соотношения Bfr/Fprau в пределах

нормы, что также соответствовало дисбиотическим показателям биологического образца донора.

Выраженное превышение референсных значений установлено для *E. coli*, *Citrobacter* spp., *A. muciniphila*, *Acinetobacter* spp. и *Streptococcus* spp. В модельной системе ТК зарегистрировано увеличение количества *C. perfringens* и *Enterobacter* spp., не обнаруженных методом ПЦР в образце faeces, что обусловлено присутствием данных микроорганизмов в концентрациях ниже порога чувствительности метода. Колонизация биореактора этими представителями обеспечила дополнительные критерии дисбактериоза.

Оценку стабильности и вариабельности микробного сообщества проводили с использованием CV микробного сообщества в обоих модельных реакторах

на протяжении 35-дневного периода культивирования (табл. 2). В реакторе-ДПК популяция *E. coli* достигла стабильного состояния уже в первую неделю эксперимента, демонстрируя CV=11,54% в период 1–7 дней с последующим снижением до 11,35% на второй неделе. Наименьшая вариабельность отмечена в период с 15-го по 35-й дни, что свидетельствовало о достижении устойчивого равновесного состояния.

В реакторе-ТК в первую неделю культивирования критически высокую вариабельность (CV >20%) демонстрировали несколько ключевых популяций: *C. perfringens* (CV=40,13%), что могло быть связано с процессом первичной колонизации и адаптации к анаэробным условиям, а также *Enterobacter* spp. (CV=27,12%) и *Enterococcus* spp. (CV=19,10%), показатель которых находился на пороге критического значения.

Во втором периоде наблюдения (8–14-й дни) большинство популяций значительно снизили свою вариабельность: *C. perfringens* до CV=9,04%, *Enterobacter* spp. до CV=12,41%, *Enterococcus* spp. до CV=7,89%. К третьему периоду (15–21-й дни) практически все популяции достигли стабильного состояния с CV менее 10%.

Заключительный период наблюдения (22–35-й дни) характеризовался достижением максимальной стабильности микробного сообщества. Большинство популяций демонстрировали CV <5%: *Bifidobacterium* spp. (CV=0,25%), *F. prausnitzii* (CV=0,35%), *Citrobacter* spp. (CV=0,38%), что указывало на формирование устойчивого микробного консорциума.

Наиболее стабильными на протяжении всего периода наблюдения оказались представители основной анаэробной микрофлоры ТК *Bacteroides* spp. и *F. prausnitzii*, а общая бактериальная масса варьировала в пределах CV=0,75–6,35%. Данные показатели свидетельствовали о высокой адаптивности основных представителей кишечной микрофлоры к условиям биореакторной системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность моделирования и длительного поддержания стабильного дисбиотического профиля создаёт основу для изучения эффективности пробиотических препаратов, пребиотиков и других корректирующих воздействий, поскольку их эффективность при воздействии

Таблица 2. Вариабельность микробиома модельных реакторов двенадцатиперстной кишки и толстой кишки

Table 2. Variability of the microbiota in the duodenal and colonic model reactors

Показатель	Коэффициент вариации в 1–7-й дни, %	Коэффициент вариации в 8–14-й дни, %	Коэффициент вариации в 15–21-й дни, %	Коэффициент вариации в 22–35-й дни, %
Реактор двенадцатиперстной кишки				
<i>E. coli</i>	11,54	11,35	7,79	8,69
Реактор толстой кишки				
Общая бактериальная масса	2,37	2,23	6,35	0,75
<i>Lactobacillus</i> spp.	13,76	10,53	1,73	4,32
<i>Bifidobacterium</i> spp.	6,95	6,53	2,22	0,25
<i>E. coli</i>	16,36	8,83	4,81	2,34
<i>Bacteroides</i> spp.	2,22	1,58	2,36	0,83
<i>F. prausnitzii</i>	2,95	0,44	0,35	0,35
<i>A. muciniphila</i>	2,61	3,41	0,42	0,58
<i>Enterococcus</i> spp.	19,10	7,89	4,00	3,12
<i>C. perfringens</i>	40,13	9,04	5,91	13,02
<i>Citrobacter</i> spp.	6,08	4,87	0,38	0,38
<i>Enterobacter</i> spp.	27,12	12,41	3,92	6,16
<i>Blautia</i> spp.	4,84	3,21	2,45	1,91
<i>Acinetobacter</i> spp.	16,19	4,01	3,38	1,42
<i>Streptococcus</i> spp.	4,81	1,40	1,40	1,48
<i>Eubacterium rectale</i>	5,25	1,77	0,92	0,92
<i>Roseburia inulinivorans</i>	4,81	2,39	1,67	1,43
<i>Prevotella</i> spp.	3,31	2,59	3,30	1,72
<i>Ruminococcus</i> spp.	4,22	4,31	2,58	2,45

на здоровый и нарушенный микробиоценоз может кардинально различаться.

Использование трёхреакторной системы «желудок–ДПК–ТК» позволит обеспечить адекватное моделирование воздействия градиентов pH, компонентов желудочного сока, жёлчи, времени транзита на вводимые в систему препараты и оценить их влияние на микробиоценоз ТК. Параметры имеющейся установки искусственного ЖКТ, включающие физические (температура, газообмен, скорость перемешивания и перекачивания) и химические (состав искусственного желудочного сока и химуса) факторы, позволили поддерживать концентрацию аэробных и анаэробных групп микроорганизмов, не допуская их критической гибели или вымывания из системы. Использование в качестве основы для кишечного химуса мясо-пептонного бульона с добавлением лактозы позволило обеспечить питательный субстрат, имитирующий по аминокислотному и углеводному составу пищу, поступающую в ЖКТ *in vivo*, и поддерживающий рост основных таксонов.

Необходимо подчеркнуть, что в подобных моделях при каждом исследовании будет использоваться новый биологический материал для загрузки искусственного ЖКТ. В связи с этим до проведения исследования из нескольких образцов *faeces* был отобран материал от пациента детского возраста, соответствующий состоянию дисбактериоза III степени и характеризующийся отклонениями одновременно по нескольким микробиологическим показателям, что позволило провести валидацию метода по широкому набору таксономических групп, которые могут встречаться и у других пациентов с дисбактериозом. Вместе с тем целенаправленно был выбран образец, не содержащий облигатных патогенов, что обеспечивает биологическую безопасность проводимых исследований. Критерием успешной валидации служила способность биореакторной системы обеспечивать длительное стабильное поддержание 18 независимых показателей микробиоценоза, характеризующих различные таксономические группы микроорганизмов — от облигатных анаэробов до факультативных анаэробов и аэробов. Комплексная валидация разработанной биореакторной модели проводилась на основании соответствия микробных профилей исходному клиническому материалу и долгосрочной стабильности сформированного микробного сообщества с использованием ПЦР. Применение молекулярно-генетического метода обеспечило качественный и количественный мониторинг трудно культивируемых анаэробов, преобладающих в ЖКТ человека. Бактериологический метод при оценке микробиоценоза в биореакторах применялся как дополнительный для контроля жизнеспособности лакто- и бифидобактерий, а также для подсчёта групп микроорганизмов, присутствующих в образцах в низких концентрациях, например, *E. coli* в реакторе–ДПК.

Задачей моделирования реакторов желудка и ДПК являлось обеспечение физико-химических условий (pH,

ферментов, солей жёлчных кислот), которые при дальнейшем применении модели могут оказывать воздействие на вводимые в систему препараты, влияя на их эффективность. В связи с этим мы не преследовали цель моделировать микробиоценозы желудка и ДПК, отличающиеся значительно более низким количеством микроорганизмов. В качестве индикаторного микроорганизма выбрали одного представителя (*E. coli*) для контроля численности бактерий в результате перекачивания содержимого между реакторами. Достигнутые значения CV менее целевых 20% свидетельствуют о стабилизации численности популяции *E. coli* и, соответственно, об оптимальных параметрах, таких как скорость и объём обмена, при моделировании системы биореакторов.

В реакторе–ТК были воспроизведены дисбиотические изменения облигатной микрофлоры, установленные для образца от донора, в том числе сниженное количество *Lactobacillus* spp., которое является одним из наиболее часто регистрируемых нарушений при дисбактериозе у детей до 7 лет [17]. Подтверждено моделирование избыточного роста условно-патогенной микрофлоры (*Citrobacter* spp., *C. perfringens*, *Acinetobacter* spp., *Streptococcus* spp.) в концентрациях, превышающих нормативные значения, что характерно для дисбиоза III степени.

Доминирующим таксоном в модели ТК являлся род *Bacteroides*, что соответствует микробиому кишечника *in vivo* [18]. Эта группа обладает разнообразными системами утилизации полисахаридов, позволяющими эффективно использовать пищевые длинноцепочечные полисахариды, недоступные хозяину, и продуцируют короткоцепочечные жирные кислоты, критически важные для целостности слизистой оболочки кишечника и иммунной регуляции. Однако при дисбиотических состояниях некоторые штаммы могут стать условно-патогенными микроорганизмами [19]. В полученной нами модели дисбиоза созданы условия для стабилизации численности *Bacteroides* spp. выше референсных значений, что является важным валидационным критерием. Вместе с тем было обеспечено поддержание соотношения *Bacteroides* spp. и *F. prausnitzii* в пределах физиологических значений, что соответствовало исходному образцу от донора. Нарушение данного соотношения ассоциировано с развитием воспалительных заболеваний в организме человека [20].

Применение порогового значения CV 20% в качестве критерия стабильности основано на результатах других исследователей [16]. Наши результаты демонстрируют, что численность ключевых популяций бактерий достигла стабильности уже с 8-го дня эксперимента. Для доминирующих *Bacteroides* spp. и *F. prausnitzii* установлен CV <5% уже в первую неделю моделирования, что свидетельствует о высокой адаптивности основных представителей анаэробной микрофлоры. Период от 8 до 14 дней можно рассматривать как минимальный срок,

необходимый для формирования стабильного искусственного микробиоценоза, воспроизводящего характерные особенности дисбиотических нарушений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования успешно разработана и валидирована методика экспериментального моделирования дисбактериоза детского кишечника с использованием системы искусственного ЖКТ. Созданная модель обеспечивает воспроизведение основных характеристик детского дисбактериоза, включая дефицит облигатной микрофлоры (*Lactobacillus* spp. и *Bifidobacterium* spp.) и избыточный рост условно-патогенных микроорганизмов (*E. coli*, *C. perfringens*, *Enterobacter* spp.), а также поддержание стабильного дисбиотического профиля в течение 35-дневного периода наблюдения. Практическое значение *in vitro* модели заключается в возможности изучить влияние исследуемых препаратов на динамику микробных популяций, оценить их устойчивость к воздействию желудочного сока, жёлчи и ферментов пищеварительного тракта, а также проанализировать механизмы взаимодействия с резидентной микрофлорой в приближенных к физиологическим условиях. Полученные в модели результаты могут стать основой для отбора наиболее перспективных компонентов терапевтических препаратов, формирования обоснованных гипотез и протоколов последующих клинических исследований.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.С. Чемисова — определение концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение эксперимента и сбор данных, работа с данными, написание рукописи; Д.А. Седова — проведение эксперимента и сбор данных, работа с данными, редактирование рукописи; С.Н. Головин — проведение эксперимента и сбор данных, работа с данными, редактирование рукописи; А.М. Ермаков — определение концепции, редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Исследование проводили с соблюдением принципов биомедицинской этики с получением информированного

согласия законных представителей ребёнка. Проведение исследования одобрено локальным независимым этическим комитетом ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (протокол № 26 от 17.09.2024).

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: O.S. Chemisova: conceptualization, methodology, investigation, data curation, writing—original draft; D.A. Sedova: investigation, data curation, writing—review & editing; S.N. Golovin: investigation, data curation, writing—review & editing; A.M. Ermakov: conceptualization, writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was conducted in accordance with the principles of biomedical ethics, with informed consent obtained from the child's legal representatives. The study protocol was approved by the local Independent Ethics Committee of the Don State Technical University (Minutes No. 26 dated September 17, 2024).

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Sender R, Fuchs S, Milo R. Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. *PLoS Biol.* 2016;14(8):e1002533. doi: 10.1371/journal.pbio.1002533
2. Almeida A, Mitchell AL, Boland M, et al. A new genomic blueprint of the human gut microbiota. *Nature.* 2019;568(7753):499–504. doi: 10.1038/s41586-019-0965-1
3. Rinninella E, Raoul P, Cintoni M, et al. What is the healthy gut microbiota composition? a changing ecosystem across age, environment, diet, and diseases. *Microorganisms.* 2019;7(1):14. doi: 10.3390/microorganisms7010014
4. Tamburini S, Shen N, Wu HC, Clemente JC. The microbiome in early life: implications for health outcomes. *Nat Med.* 2016;22(7):713–722. doi: 10.1038/nm.4142
5. Voroshilina ES, Moskvina MV, Kirillov MYu, et al. Fundamentals of modern approaches to assessing gut microbiota in children. *Neonatology: News, Views, Education.* 2023;11(3):47–59. doi: 10.33029/2308-2402-2023-11-3-47-59 EDN: LAWLUP
6. Kalashnikova IG, Nekrasova AI, Makarov VV, et al. Features of gut microbiota in atopic dermatitis and food allergy in children. *Laboratory Diagnostics. Eastern Europe.* 2024;13(S1):300–302. (In Russ.) EDN: BUFJCU
7. Ma T, Bu S, Nzerem AC, et al. Association of the infant gut microbiome with temperament at nine months of age: a michigan cohort study. *Microorganisms.* 2024;12(1):214. doi: 10.3390/microorganisms12010214

8. Schoultz I, Claesson MJ, Dominguez-Bello MG, et al. Gut microbiota development across the lifespan: Disease links and health-promoting interventions. *J Intern Med*. 2025;297(6):560–583. doi: 10.1111/joim.20089
9. Kozlovsky AA. Topical aspects of intestinal dysbiosis in children. *Pediatrics. Eastern Europe*. 2022;10(4):576–590. doi: 10.34883/PI.2022.10.4.012 EDN: VPCQWL
10. Zhu W, Zhang X, Wang D, et al. Simulator of the human intestinal microbial ecosystem (SHIME®): current developments, applications, and future prospects. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2024;17(12):1639. doi: 10.3390/ph17121639
11. Marzorati M, Vanhoecke B, De Ryck T, et al. The HMI™ module: a new tool to study the Host-Microbiota Interaction in the human gastrointestinal tract in vitro. *BMC Microbiol*. 2014;14:133. doi: 10.1186/1471-2180-14-133
12. Isenring J, Bircher L, Geirnaert A, Lacroix C. *In vitro* human gut microbiota fermentation models: opportunities, challenges, and pitfalls. *Microbiome Res Rep*. 2023;2(1):2. doi: 10.20517/mrr.2022.15
13. Biagini F, Daddi C, Calvigioni M, et al. Designs and methodologies to recreate in vitro human gut microbiota models. *Bio-des Manuf*. 2022;6(10):298–318. doi: 10.1007/s42242-022-00210-6
14. O'Hara AM, Shanahan F. The gut flora as a forgotten organ. *EMBO Rep*. 2006;7(7):688–693. doi: 10.1038/sj.embor.7400731
15. Brodkorb A, Egger L, Alminger M, et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nat Protoc*. 2019;14(4):991–1014. doi: 10.1038/s41596-018-0119-1
16. Possemiers S, Verthé K, Uyttendaele S, Verstraete W. PCR-DGGE-based quantification of stability of the microbial community in a simulator of the human intestinal microbial ecosystem. *FEMS Microbiol Ecol*. 2004;49(3):495–507. doi: 10.1016/j.femsec.2004.05.002
17. Repetskaya MN, Burdina OM, Toropova EA. Dysbiotic bowel disorders in children under modern conditions. *Medical Newsletter of Vyatka*. 2017;(4):19–23. EDN: YLYIZI
18. Zafar H, Saier MH Jr. Gut *Bacteroides* species in health and disease. *Gut Microbes*. 2021;13(1):1–20. doi: 10.1080/19490976.2020.1848158
19. Muramatsu MK, Winter SE. Nutrient acquisition strategies by gut microbes. *Cell Host Microbe*. 2024;32(6):863–874. doi: 10.1016/j.chom.2024.05.011
20. Sitkin SI, Vakhitov TYA, Tkachenko EI, et al. Gut microbiota in ulcerative colitis and celiac disease. *Experimental and Clinical Gastroenterology Journal*. 2017;(1):8–30. EDN: ZFVTVN

ОБ АВТОРАХ

*** Чемисова Ольга Сергеевна**, канд. биол. наук;
адрес: Россия, 344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, корп. 6;
ORCID: 0000-0002-4059-2878;
eLibrary SPIN: 1129-7436;
e-mail: chemisova@inbox.ru

Седова Дарья Андреевна;
ORCID: 0000-0003-1194-7251;
eLibrary SPIN: 6197-7220;
e-mail: dasedova@yandex.ru

Головин Сергей Николаевич;
ORCID: 0000-0002-1929-6345;
eLibrary SPIN: 5345-4005;
e-mail: labbiobez@yandex.ru

Ермаков Алексей Михайлович;
ORCID: 0000-0002-9834-3989;
eLibrary SPIN: 5358-3424;
e-mail: amermakov@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Olga S. Chemisova**, Cand. Sci. (Biology);
address: 1 Gagarina sq, bld 6, Rostov-on-Don, Russia, 344003;
ORCID: 0000-0002-4059-2878;
eLibrary SPIN: 1129-7436;
e-mail: chemisova@inbox.ru

Darya A. Sedova;
ORCID: 0000-0003-1194-7251;
eLibrary SPIN: 6197-7220;
e-mail: dasedova@yandex.ru

Sergey N. Golovin;
ORCID: 0000-0002-1929-6345;
eLibrary SPIN: 5345-4005;
e-mail: labbiobez@yandex.ru

Alexey M. Ermakov;
ORCID: 0000-0002-9834-3989;
eLibrary SPIN: 5358-3424;
e-mail: amermakov@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892>

EDN: MUSCHB

Активность процессов перекисного окисления липидов и содержание металлов в сыворотке крови детей пубертатного возраста, проживающих на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки

Ю.А. Тунакова¹, Р.И. Файзуллин², В.С. Валиев³¹ Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия;² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;³ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Процессы перекисного окисления липидов являются универсальным механизмом повреждения биологических мембран. Уровень образующегося в результате малонового диальдегида считается неспецифическим маркером адаптационных возможностей организма. Тесная взаимосвязь между соотношением ряда металлов и балансом окислительной и антиоксидантной систем позволит получить биологические маркеры качества жизни населения в урбоэкосистемах с высокой степенью антропогенной нагрузки (промышленно развитый город) в соотношении с территориями с малой степенью антропогенной нагрузки (сельская местность).

Цель. Определение возможной взаимосвязи между статусом урбанизированной среды, активностью процессов перекисного окисления липидов и содержанием металлов в крови детей в пубертатном возрасте. Выявление такой взаимосвязи необходимо для построения единой системы маркеров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

Методы. В сыворотке крови 48 детей, проживающих в городах и сельской местности, методом атомно-абсорбционной спектроскопии определяли содержание железа (Fe), меди (Cu), цинка (Zn), стронция (Sr) и свинца (Pb). У детей фиксировали рост, вес и определяли площадь поверхности тела. Оценивали концентрацию малонового диальдегида в сыворотке крови потенциально здоровых детей в пубертатном возрасте по реакции с тиобарбитуровой кислотой. Распределение полученных значений малонового диальдегида и концентраций металлов оценивали статистически по группам исследования, корреляционные взаимосвязи — методом Спирмена. Для оценки значимости отдельных показателей провели дискриминантный анализ, использовали метод множественной регрессии.

Результаты. Не отмечено никаких значимых изменений концентраций Sr в контексте взаимосвязи с малоновым диальдегидом и с содержанием других металлов. Для Cu отмечены достаточно заметные корреляции с уровнями малонового диальдегида и с остальными металлами. Так, изменчивость концентраций Cu повторяет изменчивость концентраций Fe, но выражена значительно слабее. При построении модели множественной регрессии концентрации Cu вместе с Zn и площадью тела представляют наибольшую статистическую значимость. Методом дискриминантного анализа установлено, что содержание Pb обусловлено особенностями урбоэкосистемы, а активность процессов перекисного окисления липидов у детей может значительно меняться в зависимости от степени урбанизированности окружающей среды, статистически значимо возрастая в городских условиях.

Заключение. Установлена взаимосвязь между интенсивностью антропогенной нагрузки, активностью процессов перекисного окисления липидов и содержанием металлов в крови детей для оценки адаптационного резерва организма. Также установлена взаимосвязь между концентрациями малонового диальдегида и цинка, железа и меди в сыворотке крови. Отмечены более высокие концентрации малонового диальдегида в сыворотке крови детей, проживающих в городской среде с высокой антропогенной нагрузкой. Взаимосвязи между металлами и малоновым диальдегидом могут быть использованы для оценки адаптационного резерва организма человека.

Ключевые слова: маркер дезадаптации; перекисное окисление липидов; металлы; взаимосвязь.

Как цитировать:

Тунакова Ю.А., Файзуллин Р.И., Валиев В.С. Активность процессов перекисного окисления липидов и содержание металлов в сыворотке крови детей пубертатного возраста, проживающих на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

Рукопись поступила: 06.03.2025

Рукопись одобрена: 20.10.2025

Опубликована online: 27.10.2025

Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Lipid Peroxidation and Serum Metal Levels in Adolescents in Regions With Various Degrees of Man-Induced Load

Yulia A. Tunakova¹, Rashat I. Faizullin², Vsevolod S. Valiev³

¹ Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia;

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia;

³ Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Lipid peroxidation is a universal mechanism of biological membrane damage. The resulting malondialdehyde levels are a non-specific marker of the body's adaptive capabilities. A strong correlation between the levels of some metals and the oxidant/antioxidant balance may provide biological markers of quality of life in urban ecosystems with high man-induced load (industrial cities) versus regions with low man-induced load (rural areas).

AIM: The work aimed to assess the potential association between the urbanized environment status, lipid peroxidation levels, and serum metal levels in adolescents. This association is essential for creating a unified systems of adaptive capability markers in regions with different levels of exposure.

METHODS: The levels of iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), strontium (Sr), and lead (Pb) were assessed by atomic absorption spectroscopy in the serum of 48 adolescents residing in urban and rural areas. The height, body weight, and body surface area were measured. Serum malondialdehyde levels were assessed in apparently healthy adolescents using the thiobarbituric acid reaction. The significance of intergroup differences in malondialdehyde and metal levels was assessed, and Spearman correlation analysis was performed. The significance of individual parameters was assessed using multiple regression discriminant analysis.

RESULTS: There were no significant changes in Sr levels associated with the levels of malondialdehyde or other metals. Cu levels showed significant correlations with the levels of malondialdehyde and other metals. Changes in Cu levels, though less pronounced, were consistent with changes in Fe levels. A multiple regression model found that Cu levels, together with Zn levels and body surface area, were the most significant parameters. The discriminant analysis found that Pb levels are determined by the urban ecosystem characteristics, and lipid peroxidation activity in children may vary considerably depending on the urbanized environment status and increases significantly in urban areas.

CONCLUSION: An association has been found between the degree of man-induced load, lipid peroxidation activity, and serum metal levels in children, which enables assessing the body's adaptive capabilities. Furthermore, an association has been discovered between serum malondialdehyde levels and serum zinc, iron, and copper levels. Serum malondialdehyde levels are higher in children residing in urban areas with high man-induced load. Metal–malondialdehyde associations can be used to assess the body's adaptive capabilities.

Keywords: maladaptation marker; lipid peroxidation; metals; association.

To cite this article:

Tunakova YuA, Faizullin RI, Valiev VS. Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Lipid Peroxidation and Serum Metal Levels in Adolescents in Regions With Various Degrees of Man-Induced Load. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892>

EDN: MUSCHB

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892>

EDN: MUSCHB

居住在不同人为负荷区域的青春期儿童血清脂质过氧化过程活性与金属含量

Yulia A. Tunakova¹, Rashat I. Faizullin², Vsevolod S. Valiev³¹ Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia;² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia;³ Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

摘要

论证。脂质过氧化过程是损伤生物膜的普遍机制之一。其产物丙二醛水平被视为机体适应能力的非特异性标志物。若特定金属比例与氧化-抗氧化体系平衡之间存在紧密关联,则可获得用于比较高人为负荷(工业化城市)与低人为负荷(农村地区)区域居民生活质量的生物学标志物。

目的。确定城市环境状态、脂质过氧化过程活性与青春期儿童血清金属含量之间可能存在的关系。识别此类关系对于构建适用于不同暴露强度条件下人体适应储备的统一指标体系具有必要性。

方法。对居住在城市与农村地区的48名青春期儿童血清样本进行原子吸收光谱分析,测定铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)、锶(Sr)及铅(Pb)含量。记录受试者身高、体重及体表面积。丙二醛浓度在青春期潜在健康儿童的血清中采用硫代巴比妥酸反应法进行测定。分别按研究分组对丙二醛与金属浓度分布进行统计分析;相关性采用Spearman方法评估。为评估单项指标的显著性,使用判别分析和多元回归。

结果。Sr含量的变化与丙二醛水平及其他金属无显著相关。Cu与丙二醛以及其他金属之间存在较为明显的相关性。Cu浓度的变异趋势与Fe相似,但表达程度明显较弱。在多元回归模型中,Cu与Zn及体表面积具有最高统计显著性。判别分析表明,Pb含量由城市生态系统特征所决定,而儿童脂质过氧化过程活性可随环境城市化程度显著变化,在城市条件下呈统计学显著升高。

结论。确认了人为负荷强度、脂质过氧化过程活性及儿童血清金属含量之间的关联,这些关系可用于评估机体适应储备。此外,丙二醛与锌、铁、铜之间也存在相关性。居住在高人为负荷城市环境的儿童血清丙二醛水平更高。金属与丙二醛之间的关系可作为人体适应储备评估的参考指标。

关键词: 失适应标志物; 脂质过氧化; 金属; 相关性。

引用本文:

Tunakova YuA, Faizullin RI, Valiev VS. 居住在不同人为负荷区域的青春期儿童血清脂质过氧化过程活性与金属含量. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

收到: 06.03.2025

接受: 20.10.2025

发布日期: 27.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Способность к адаптации является важнейшим свойством живых систем. Адаптация как приспособление организма к меняющимся условиям среды осуществляется системно и, в первую очередь, на клеточном уровне, поэтому адаптивный эффект реализуется, как правило, через мембранные системы клеток, а их состояние является стартовым звеном в цепи приспособительных реакций, при этом повреждающие эффекты неблагоприятных факторов неизбежно отражаются на целостности и устойчивости клеточных мембран, поэтому продукты окисления липидного слоя, попадая в плазму крови, формируют повышенный их уровень, легко оцениваемый в динамике [1].

В последние годы возрос интерес к поиску маркёров популяционной дезадаптации, в частности, к процессам перекисного окисления липидов (ПОЛ) как универсального механизма повреждения биологических мембран [2, 3]. При этом уровень образующегося в результате малонового диальдегида (МДА) считается неспецифическим маркёром адаптационных возможностей организма, а отмеченная многими исследователями [4–8] тесная взаимосвязь между соотношением ряда металлов и балансом окислительной и антиоксидантной систем открывает возможности к получению биологических маркёров для практической реализации моделей популяционного контроля качества жизни населения на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки.

Цель исследования. Определение возможной взаимосвязи между статусом урбанизированной среды, активностью процессов ПОЛ и содержанием металлов в крови детей в пубертатном возрасте. Выявление такой взаимосвязи необходимо для построения единой системы маркёров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования служила сыворотка крови потенциально здоровых (не имеющих хронических заболеваний на момент обследования) детей в пубертатном возрасте (12–14 лет), проживающих на территориях с различной антропогенной нагруженностью урбоэкосистем: в городской среде (Казань) и в сельской местности (Высокогорский и Арский районы Республики Татарстан).

Материал исследования

Обследовано 48 человек. Распределение обследуемых по территории проживания и половому составу представлено следующим образом: 25 детей из города (11 мальчиков и 14 девочек; 44 и 56% соответственно); 23 — из сельской местности (9 мальчиков и 14 девочек; 39 и 61%

соответственно). У детей фиксировали рост, вес и определяли площадь поверхности тела по R.D. Mosteller [9]. Исследования проводили с ноября 2024 по февраль 2025. Для анализа использовали сыворотку крови.

При формировании групп учитывали следующие факторы: общая возрастная группа, разделение по полу (мальчики и девочки) и месту жительства (квартира в городе, частный сельский дом), обязательное отсутствие в анамнезе хронических заболеваний, полная семья. Исследование носило рекогносцировочный характер, поэтому подробного анкетирования не проводили.

Исследование одобрено локальным этическим комитетом Казанского (Приволжского) федерального университета (протокол № 50 от 26.09.2024).

Определение малонового диальдегида

В настоящем исследовании использовали общепринятый способ определения концентрации МДА по реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) [10, 11]. Растворение ТБК проводят в присутствии тритона X-100, препятствующего выпадению ТБК в осадок, для стабилизации триметинового комплекса добавляется трилон Б, а денатурированные сывороточные белки растворяются смесью этанола с хлороформом в соотношении 7:3 [12].

В основе метода лежит реакция между МДА и ТБК, которая при высокой температуре и в кислой среде протекает с образованием окрашенного в розовый цвет триметинового комплекса, содержащего одну молекулу МДА и две молекулы ТБК. Максимум поглощения комплекса приходится на 532 нм.

Рабочий раствор ТБК готовили путём растворения навески ТБК 864 мг в 100 мл смеси, содержащей 1% раствора тритона X-100 и 8,2 М раствора этанола. Остальные растворы готовили на бидистиллированной воде.

К 1,5 мл сыворотки последовательно добавляли 0,5 мл 1% раствора тритона X-100, 0,2 мл 0,6 М раствора HCl и 0,8 мл 0,06 М рабочего раствора ТБК. Смесь нагревали в кипящей водяной бане в течение 10 мин. Охлаждение проводили при 15 °C в течение 30 мин. Для стабилизации окраски добавляли 0,2 мл 5 М раствора трилона Б и доводили объём до 10 мл смесью этанола с хлороформом в соотношении 7:3. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре СФ-46 при 532 нм в стеклянной кювете шириной 1 см. Контролем служил холостой образец, в который вместо сыворотки добавляли бидистиллированную воду. В расчётах МДА использовали молярный коэффициент экстинкции, равный 0,156 мкМ⁻¹·см⁻¹.

Расчёт концентрации МДА в сыворотке крови проводят по формуле:

$$C_{\text{МДА}} = \frac{(D_1 - D_2) \times U_2}{\epsilon \times L \times U_1},$$

где D_1 — оптическая плотность образца с сывороткой; D_2 — оптическая плотность контроля; U_1 — объём сыворотки, взятой на определение, 1,5 мл; U_2 — конечный

объём смеси, 10 мл; L — длина кюветы, 1 см; $\epsilon=0,156$ — коэффициент молярной экстинкции комплекса МДА–ТБК в л/мкмоль/см. Результат представлен в мкмоль/л.

Определение содержания металлов

В полученной сыворотке крови методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst 400 (Perkin Elmer, США) определяли содержание железа (Fe), меди (Cu), цинка (Zn), стронция (Sr) и свинца (Pb).

Zn определяли по резонансной линии 213,9 нм с пределом обнаружения 1,5 мкг/л, Cu — 324,8 нм с пределом обнаружения 1 мкг/л, Fe — 248,3 нм с пределом обнаружения 5 мкг/л, Sr — 460,7 нм с пределом обнаружения 3 мкг/л, Pb — 283,3 нм с пределом обнаружения 7 мкг/л. Свинец определяли на безэлектродной высокочастотной лампе, остальные металлы — на лампах с полым катодом.

Калибровочные растворы готовили соответствующим разведением государственного стандартного образца. Измерение концентраций Zn, Cu, Fe, Sr осуществляли непосредственно в сыворотке крови с предварительным разведением 1:2 бидистиллированной водой. Свинец определяли после осаждения белков. Для этого к 1,5 мл сыворотки крови добавляли 0,75 мл 1,5% раствора HCl и инкубировали в течение 1 ч при 37 °C. После гидролиза белков их осаждали 0,75 мл 20% трихлоруксусной кислотой и центрифугировали в течение 10 мин при 1500 об/мин, разведение при этом также составило 1:2. Надосадочную жидкость использовали для анализа [13]. Результат представлен в мг/л.

Статистические методы

Распределение полученных значений МДА и концентраций металлов оценивали статистически (Statistica 6): по группам исследования рассчитывали средние значения (M) и стандартные отклонения (SD), статистическую значимость различий оценивали по U -критерию

Манна–Уитни, корреляционные взаимосвязи — методом Пирсона. Для оценки значимости отдельных показателей провели дискриминантный анализ, использовали метод множественной линейной регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты исследования уровней МДА и металлов в сыворотке крови представлены в табл. 1.

Содержание МДА по всем наблюдениям колебалось в пределах 0,629–1,995 мкмоль/л, составив в среднем $1,059 \pm 0,368$ мкмоль/л, Zn — в пределах 0,444–1,310 мг/л, в среднем — $0,787 \pm 0,187$ мг/л, Cu — в пределах 0,413–1,811 мг/л, в среднем — $0,921 \pm 0,303$ мг/л, Fe — в пределах 0,417–2,900 мг/л, в среднем — $1,434 \pm 0,647$ мг/л, Sr — в пределах 0,053–0,222 мг/л, в среднем — $0,117 \pm 0,050$ мг/л, Pb — в пределах 0,010–0,071 мг/л, в среднем $0,045 \pm 0,014$ мг/л.

Оценка нормальности распределения показала, что распределение рассматриваемых значений близко к нормальному (критерий Шапиро–Уилка для всех показателей $W > 0,9$).

Оценивая результаты, представленные в табл. 1, следует отметить более высокие значения концентраций МДА у детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, вне зависимости от пола. При этом общая тенденция такова, что у девочек всегда отмечались более высокие значения МДА по сравнению с мальчиками, однако статистически значимые различия были только среди городских детей.

По-видимому, одним из факторов повышения активности ПОЛ у девочек является их большая физиологическая зрелость, сопровождаемая увеличением площади тела ($1,53 \text{ м}^2$ против $1,42 \text{ м}^2$ у мальчиков), при этом отмечена корреляционная взаимосвязь между МДА и площадью тела ($r=0,32$; $p < 0,05$). Следует отметить, что средний возраст девочек и мальчиков был примерно одинаковым:

Таблица 1. Результат исследования содержаний малонового диальдегида (мкмоль/л) и металлов (мг/л) в сыворотке крови ($M \pm SD$)

Table 1. Serum malondialdehyde ($\mu\text{mol/L}$) and metal (mg/L) levels ($M \pm SD$)

Группа исследования	Малоновый диальдегид	Zn	Cu	Fe	Sr	Pb
Городская территория						
Девочки	$1,371 \pm 0,395^*$	$0,645 \pm 0,123$	$1,064 \pm 0,400$	$1,759 \pm 0,522^1$	$0,112 \pm 0,049$	$0,053 \pm 0,013$
Мальчики	$0,993 \pm 0,282$	$0,808 \pm 0,164^*$	$0,876 \pm 0,168$	$1,283 \pm 0,441$	$0,117 \pm 0,040$	$0,049 \pm 0,013$
Вся группа	$1,235 \pm 0,398^{**}$	$0,704 \pm 0,157$	$0,996 \pm 0,343$	$1,588 \pm 0,601$	$0,114 \pm 0,045$	$0,052 \pm 0,012^2$
Сельская территория						
Девочки	$0,933 \pm 0,230$	$0,820 \pm 0,181$	$0,882 \pm 0,214$	$1,524 \pm 0,761^*$	$0,125 \pm 0,062$	$0,039 \pm 0,011$
Мальчики	$0,797 \pm 0,162$	$0,938 \pm 0,161$	$0,790 \pm 0,252$	$0,983 \pm 0,415$	$0,117 \pm 0,051$	$0,036 \pm 0,014$
Вся группа	$0,868 \pm 0,208$	$0,877 \pm 0,178^{**}$	$0,838 \pm 0,232$	$1,266 \pm 0,666$	$0,121 \pm 0,056$	$0,037 \pm 0,012$

Примечание. * Статистически значимые ($p < 0,05$) более высокие значения при внутригрупповом сравнении мальчиков и девочек; ** статистически значимые ($p < 0,01$) более высокие значения при межгрупповом сравнении жителей городской и сельской местности.

12,70±0,89 года у девочек и 12,80±0,93 года у мальчиков. Корреляционные взаимосвязи оценивали методом Спирмена (табл. 2).

Ещё одной интересной закономерностью является более низкое содержание Zn в группе детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, то есть при высоких уровнях МДА. Корреляционный анализ подтверждает эту взаимосвязь, отмечая наличие высокой статистически значимой отрицательной корреляции между концентрациями Zn и содержанием МДА в сыворотке крови (см. табл. 2).

При этом именно для девочек характерны низкие концентрации Zn и более высокие концентрации Fe при высоких значениях МДА. Таким образом, низкие значения концентрации Zn, сопровождающиеся высоким уровнем сывороточного Fe, возможно, также являются фактором повышения активности ПОЛ. Относительно небольшая выборка обследуемых не даёт возможности однозначно интерпретировать качество полученных взаимосвязей, в связи с чем мы указываем на них как на констатацию статистических закономерностей в конкретном наборе данных.

Обобщённая картина изменчивости концентраций МДА в сыворотке крови в зависимости от участка исследования, пола подростков и концентраций Zn в крови представлена на рис. 1. На рисунке следует обратить внимание на более выраженное снижение МДА при увеличении концентраций Zn у городских детей.

Другой важной особенностью является повышенное содержание Pb в сыворотке крови детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, статистически более высокое, чем в крови детей, проживающих в сельской местности (см. табл. 1). Кроме того, отмечена высокая прямая корреляционная взаимосвязь между концентрациями этого металла и МДА, а также высокая обратная корреляция с концентрациями Zn, что позволяет рассматривать высокие уровни Pb в качестве одного из элементов активации ПОЛ. Так как статистически значимых различий по содержанию Pb между мальчиками и девочками отмечено не было, можно предположить, что содержание этого металла обусловлено только особенностями формирующейся на территории проживания урбоэкосистемы.

При построении модели множественной регрессии с пошаговым включением признаков (Forward stepwise) значения Cu вместе с Zn и площадью тела представляют наибольшую статистическую значимость (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что нормализованные весовые коэффициенты (Beta) значений Cu превышают даже показатель площади тела при сопоставимой ошибке, в большей степени уравнивая в модели влияние изменчивости Zn.

Для оценки классифицирующего вклада тех или иных показателей при сопоставлении их распределения между двумя группами обследуемых с территорий с различной

Таблица 2. Корреляционная матрица Спирмена, отражающая взаимосвязи между различными показателями

Table 2. Spearman correlation matrix for associations between various parameters

Переменные	Площадь тела	Малоновый диальдегид	Zn	Fe	Cu	Sr	Pb
Площадь тела	1,00	0,23	-0,28	0,12	0,07	0,11	0,28
Малоновый диальдегид	0,23	1,00	-0,94	0,59	0,42	0,04	0,70
Zn	-0,28	-0,94	1,00	-0,59	-0,31	-0,05	-0,67
Fe	0,12	0,59	-0,59	1,00	0,32	0,14	0,32
Cu	0,07	0,42	-0,31	0,32	1,00	0,21	0,28
Sr	0,11	0,04	-0,05	0,14	0,21	1,00	0,12
Pb	0,28	0,70	-0,67	0,32	0,28	0,12	1,00

Примечание. Выделены полужирным статистически значимые коэффициенты, $p < 0,05$.

Таблица 3. Параметры множественной линейной регрессии, объединяющей значения концентраций Zn, Cu и величину площади поверхности тела с уровнем значений малонового диальдегида в сыворотке крови

Table 3. Multiple linear regression parameters for associations between Zn levels, Cu levels, body surface area, and serum malondialdehyde levels

Параметры уравнения	Beta	Ошибка Beta	B	Ошибка B	Критерий t Стьюдента	Уровень значимости p
Свободный член	—	—	1,43511	0,227954	6,29560	<0,001
Zn	-0,626427	0,080363	-1,22925	0,157697	-7,79497	<0,001
Cu	0,354623	0,077370	0,43074	0,093977	4,58350	<0,001
Площадь тела	0,145617	0,071194	0,13051	0,063809	2,04535	0,047

Примечание. Коэффициент корреляции $R=0,89$; коэффициент детерминации $R^2=0,79$; критерий $F=57,483$; уровень значимости $p < 0,001$; Beta — нормализованные весовые коэффициенты; B — абсолютные весовые коэффициенты.

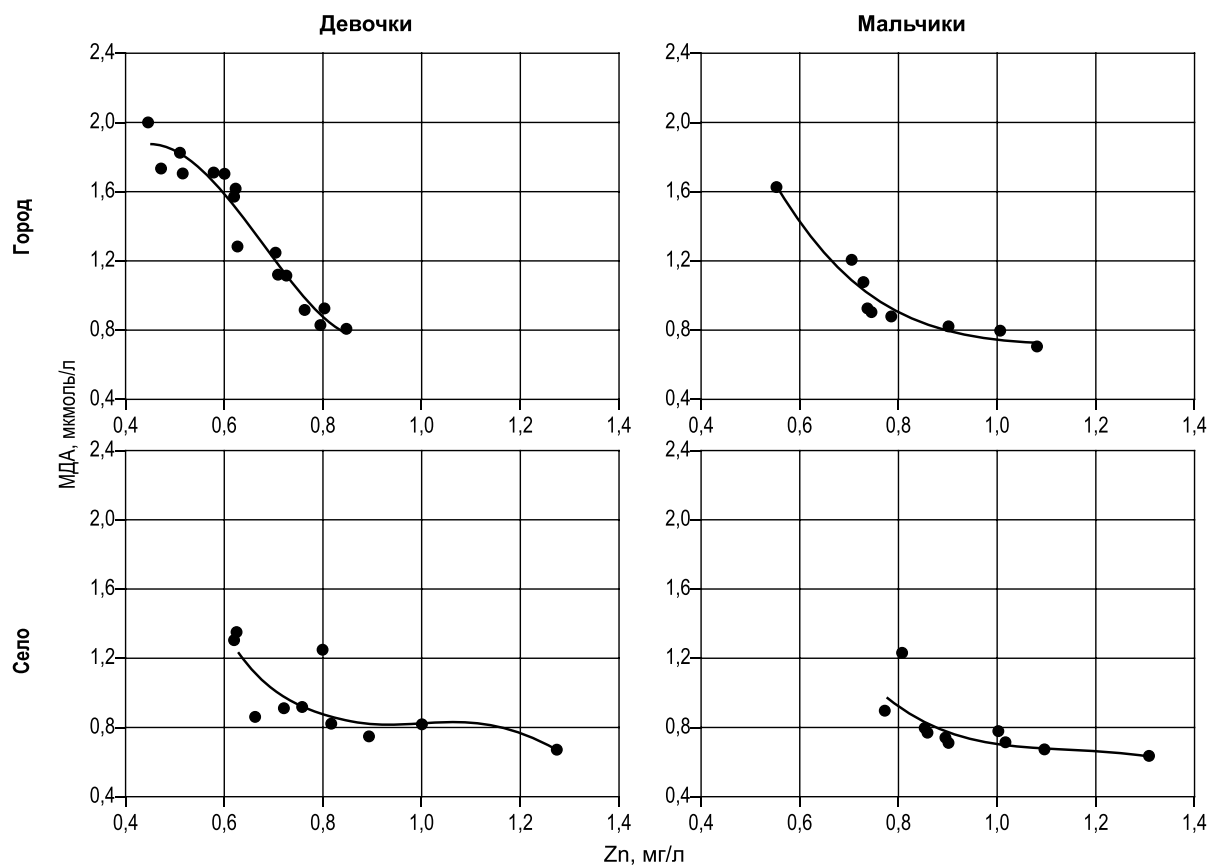


Рис 1. Изменчивость концентраций малонового диальдегида (МДА) в сыворотке крови подростков в разных экспериментальных группах в зависимости от содержания цинка.
Fig. 1. Variability of serum malondialdehyde (MDA) levels in adolescents in different study groups depending on zinc levels.

степенью антропогенной нагрузки использовали дискриминантный анализ, который в режиме пошагового включения признаков позволил выделить два главных показателя, наиболее сильно влияющих на классификацию наблюдений (их отнесение к той или иной урбоэкосистеме): значения МДА и Pb (табл. 4).

Значения именно этих показателей способны с высокой долей вероятности указать, к какой территории проживания относится то или иное наблюдение. Соответственно, подтверждается предположение о том, что содержание Pb обусловлено особенностями урбоэкосистемы, а активность процессов ПОЛ у детей может значительно меняться в зависимости от степени урбанизированности окружающей среды, статистически значимо возрастая в условиях урбоэкосистем с высокой степенью антропогенной нагрузки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Совершенно неактивным металлом в контексте взаимосвязи с МДА и в связи с содержанием других металлов является Sr. Не отмечено никаких значимых изменений его концентраций. В то же время для Cu отмечены достаточно заметные корреляции как с уровнями МДА, так и со многими металлами, хотя статистически значимых различий средних значений концентраций в разных группах отмечено не было. Общая тенденция такова, что изменчивость концентраций Cu повторяет изменчивость Fe, но выражена значительно слабее. Возможно, это обусловлено сочетанием известного антагонизма Cu и Zn с синергизмом Cu и Fe, в результате чего формируется сложная картина взаимосвязей, трудно интерпретируемая на небольших рядах наблюдений.

Таблица 4. Главные классифицирующие показатели, выделенные дискриминантным анализом

Table 4. Primary classifying parameters identified by the discriminant analysis

Показатель (n=48)	Лямбда Уилкса	Критерий F-remove	Уровень значимости p	Коэффициент детерминации R ²
Малоновый диальдегид	0,747561	3,768241	0,049	0,253051
Pb	0,747254	3,748199	0,049	0,253051

Примечание. Критерий F=10,118; уровень значимости p <0,0002.

Отмеченная закономерность более низкого содержания цинка в сыворотке крови девочек по сравнению с мальчиками, возможно, связана с особенностями развития женского и мужского организмов. Например, с участием цинка в половом созревании мальчиков [14], а также с участием меди и цинка в функционировании супероксиддисмутазы, при этом медь и цинк находятся в конкурентных отношениях, что сказывается на активности супероксиддисмутазы [15]. По всей видимости, такая чувствительность антиоксидантных систем организма к содержанию отдельных металлов требует более критичной оценки роли продуктов ПОЛ, в частности МДА, в качестве маркёров окислительного стресса.

Проведённое исследование позволяет отметить наличие взаимосвязи между концентрациями МДА и некоторых металлов (Zn, Fe, Cu) в сыворотке крови. Отмечены более высокие концентрации МДА в сыворотке крови детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, по сравнению с проживающими в сельской местности ($p < 0,01$).

Факторами повышения активности ПОЛ у подростков являются относительно более высокие значения площади поверхности тела, относительно низкие концентрации Zn и более высокие концентрации Cu и Fe в сыворотке крови, а также проживание в городской урбоэкосистеме при повышенных концентрациях свинца в сыворотке крови. Взаимосвязь активности процессов ПОЛ с уровнем содержания металлов особенно ярко проявляется в группе детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, при этом у девочек пубертатного возраста отмеченные тенденции выражены ещё сильнее, что позволяет рассматривать их как целевую группу при проведении скрининговых исследований оксидативного стресса популяции в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлен ряд закономерностей, позволяющих актуализировать важные взаимосвязи между металлами и МДА в рамках общей системы маркёров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

В связи с относительно небольшой аналитической выборкой полноценное обобщение результатов представляется затруднительным. Однако наличие выраженных статистически значимых различий между группами исследования констатирует определённую детерминированность наблюдаемых характеристик и предполагает наличие закономерностей в явлениях, что актуализирует проведение в будущем более масштабного и репрезентативного исследования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Ю.А. Тунакова — подготовка протокола исследования, подготовка первого варианта статьи; Р.И. Файзуллин — подготовка обзора литературы, правки текста; В.С. Валиев — сбор и анализ данных, статистический анализ, интерпретация результатов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Казанского (Приволжского) федерального университета (протокол № 50 от 24.09.2024).

Источники финансирования. Исследование выполнено в рамках реализации темы государственного задания, научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по соглашению номер № 075-03-2025-335 от 16.01.2025 г., тема № FZSU-2023-0005 (рег. № 123030100016-5).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Yu.A. Tunakova: methodology, writing—original draft; R.I. Faizullin: investigation, writing—review & editing; V.S. Valiev: investigation, formal analysis. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the Local Ethics Committee of Kazan (Volga Region) Federal University (Protocol No. 50 dated September 24, 2024).

Funding sources: The study was conducted as part of a state assignment; research were supported by the Ministry of Education and Science of Russia under agreement No. 075-03-2025-335 of January 16, 2025, topic No. FZSU-2023-0005 (registration number: 123030100016-5).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Deryugina AV, Koryagin AS, Kopylova SV, Talamanova MN. *Methods of studying stress and adaptation reactions of the organism by blood system indicators*. Nizhny Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosuniversiteta; 2010. 25 p. (In Russ.)
URL: <https://studfile.net/preview/5243809/>
2. Gawel S, Wardas M, Niedworok E, Wardas P. Dialdehyd malonowy (MDA) jako wskaźnik procesów peroksydacji lipidów w organizmie [Malondialdehyde (MDA) as a lipid peroxidation marker]. *Wiad Lek*. 2004;57(9-10):453–455. Polish.
3. Taha SAY, Shokeir AA, Mortada WI, et al. Effect of copper and zinc ions on biochemical and molecular characteristics of calcium oxalate renal stones: a controlled clinical study. *Biol Trace Elem Res*. 2024;202(2):410–422. doi: 10.1007/s12011-023-03686-0
4. Samet JM, Chen H, Pennington ER, Bromberg PA. Non-redox cycling mechanisms of oxidative stress induced by PM metals. *Free Radic Biol Med*. 2020;151:26–37. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.12.027
5. Chebieb I, Medjati ND, Harek Y, et al. Imbalance of plasma copper and zinc levels and the association between the Cu/Zn ratio and lipid peroxidation in Algerian bipolar patients. *Biol Trace Elem Res*. 2024;202(6):2450–2456. doi: 10.1007/s12011-023-03858-y
6. Spirlandeli AL, Deminice R, Jordao AA. Plasma malondialdehyde as biomarker of lipid peroxidation: effects of acute exercise. *Int J Sports Med*. 2014;35(1):14–18. doi: 10.1055/s-0033-1345132
7. Tucker PS, Dalbo VJ, Han T, Kingsley MI. Clinical and research markers of oxidative stress in chronic kidney disease. *Biomarkers*. 2013;18(2):103–115. doi: 10.3109/1354750X.2012.749302
8. Sun M, Yan G, Sun S, et al. Malondialdehyde and zinc may relate to severity of microvascular complications in diabetes: a preliminary study on older adults with type 2 diabetes mellitus in Northeast China. *Clin Interv Aging*. 2024;19:1141–1151. doi: 10.2147/CIA.S464615
9. Mosteller RD. Simplified calculation of body-surface area. *N Engl J Med*. 1987;317(17):1098. doi: 10.1056/NEJM19871023171717
10. Janero DR. Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury. *Free Radic Biol Med*. 1990;9(6):515–540. doi: 10.1016/0891-5849(90)90131-2
11. Ko KM, Godin DV. Ferric ion-induced lipid peroxidation in erythrocyte membranes: effects of phytic acid and butylated hydroxytoluene. *Mol Cell Biochem*. 1990;95(2):125–131. doi: 10.1007/BF00219970
12. Patent RUS № 2112241 / 27.05.1998. Rogozhin VV, Kuriljuk TT, Kershengolts BM. *Method for determining malonic dialdehyde concentration by using thiobarbituric acid*. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/41/e4/e7/075ccde56f4a5b/RU2112241C1.pdf> EDN: KXWDOC
13. Khavezov I, Tsalev D. *Atomic absorption analysis*. Leningrad: Khimiya; 1983. 144 p. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001160547>
14. Prasad AS, Mantzoros CS, Beck FW, et al. Zinc status and serum testosterone levels of healthy adults. *Nutrition*. 1996;12(5):344–348. doi: 10.1016/s0899-9007(96)80058-x
15. Elchuri S, Oberley TD, Qi W, et al. CuZnSOD deficiency leads to persistent and widespread oxidative damage and hepatocarcinogenesis later in life. *Oncogene*. 2005;24(3):367–380. doi: 10.1038/sj.onc.1208207

ОБ АВТОРАХ

* **Тунакова Юлия Алексеевна**, д-р хим. наук, профессор;
адрес: Россия, 421001, Казань, ул. Четаева, д. 18;
ORCID: 0000-0002-8826-8639;
eLibrary SPIN: 5247-9698;
e-mail: juliaprof@mail.ru

Файзуллин Рашат Искандарович, канд. мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-6033-6356;
eLibrary SPIN: 4818-6504;
e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru

Валиев Всеволод Сергеевич;
ORCID: 0000-0002-8848-5326;
eLibrary SPIN: 6871-9839;
e-mail: podrost@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Yulia A. Tunakova**, Dr. Sci. (Chemistry), Professor;
address: 18 Chetaeva st, Kazan, Russia, 421001;
ORCID: 0000-0002-8826-8639;
eLibrary SPIN: 5247-9698;
e-mail: juliaprof@mail.ru

Rashat I. Faizullin, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-6033-6356;
eLibrary SPIN: 4818-6504;
e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru

Vsevolod S. Valiev;
ORCID: 0000-0002-8848-5326;
eLibrary SPIN: 6871-9839;
e-mail: podrost@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Череповце по данным дистанционного зондирования Земли

С.А. Царева^{1,2}, Е.Г. Лилеева², Ю.В. Царев¹, Н.С. Дыбулина¹, С.Ф. Велиметова¹

¹ Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;

² Ярославский государственный медицинский университет, Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время наряду с традиционными методиками определения концентраций загрязнителей атмосферного воздуха находит широкое применение спутниковый мониторинг содержания поллютантов в воздушной среде. Хотя спутниковые технологии позволяют получать данные о содержании загрязнителей в атмосфере для различных диапазонов географических координат, возникают вопросы релевантности использования подобных технологий, в том числе и основанных на них оценках качества воздуха селитебной территории.

Цель. Анализ загрязнения атмосферного воздуха Череповца на основании спутниковых данных Sentinel-5P и их сопоставления с данными наземного мониторинга.

Методы. Объектом исследования являются геопространственные данные состояния атмосферного воздуха Череповца. Спутниковые данные Sentinel-5P, предоставляемые Европейским космическим агентством в рамках программы Copernicus, анализировали в программном обеспечении, созданном на базе облачной платформы Google Earth Engine. Данные спутникового мониторинга сопоставляли с данными открытого сервиса ПАО «Северсталь» мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце.

Результаты. В облачной среде Google Earth Engine на языке программирования JavaScript разработано программное обеспечение для анализа данных спутникового мониторинга атмосферного воздуха Череповца. Получены цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы. Данные оценок концентраций спутникового мониторинга сопоставлены с данными наземного мониторинга ПАО «Северсталь».

Заключение. Разработано программное обеспечение, позволяющее строить цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха критериальными загрязнителями (диоксидом серы и азота). Проанализировано различие данных спутникового мониторинга и наземного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха Череповца.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг; загрязнение воздуха; наземный мониторинг; сопоставление; оксид азота; оксид серы.

Как цитировать:

Царева С.А., Лилеева Е.Г., Царев Ю.В., Дыбулина Н.С., Велиметова С.Ф. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Череповце по данным дистанционного зондирования Земли // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco678829>

EDN: JRSOAX

Atmospheric Pollution in Cherepovets According to Remote Sensing

Sophia A. Tsareva^{1,2}, Elena G. Lileeva², Yuri V. Tsarev¹, Nataliya S. Dybulina¹,
Sabrina F. Velimetova¹

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

² Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Satellite monitoring of air pollutant levels is currently widely used alongside conventional methods for assessing atmospheric pollution. Satellite technologies provide information on atmospheric pollutant levels for various geographic coordinate ranges; however, their applicability, notably for assessing air quality in residential areas, is disputed.

AIM: The work aimed to assess atmospheric pollution in Cherepovets by comparing Sentinel-5P satellite data with Earth-based monitoring data.

METHODS: The study assessed geospatial data on atmospheric air quality in Cherepovets. Sentinel-5P satellite data provided by the European Space Agency under the Copernicus program were analyzed using Google Earth Engine-based software. Satellite monitoring data were compared with those from the Severstal open service for atmospheric air quality monitoring in Cherepovets.

RESULTS: Software for analyzing satellite monitoring data on atmospheric air quality in Cherepovets was developed using Google Earth Engine and JavaScript. Digital maps of nitrogen dioxide and sulfur dioxide atmospheric pollution were created. Satellite monitoring data were compared with Severstal's Earth-based monitoring data.

CONCLUSION: Software for creating digital maps of atmospheric pollution by criteria pollutants (sulfur dioxide and nitrogen dioxide) has been developed. The differences between satellite and Earth-based monitoring data on atmospheric pollution in Cherepovets were analyzed.

Keywords: satellite monitoring; air pollution; Earth-based monitoring; comparison; nitrogen oxide; sulfur oxide.

To cite this article:

Tsareva SA, Lileeva EG, Tsarev YuV, Dybulina NS, Velimetova SF. Atmospheric Pollution in Cherepovets According to Remote Sensing. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

Received: 23.04.2025

Accepted: 03.10.2025

Published online: 14.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco678829>

EDN: JRSOAX

基于对地遥感数据的Cherepovets市大气污染评估

Sophia A. Tsareva^{1,2}, Elena G. Lileeva², Yuri V. Tsarev¹, Nataliya S. Dybulina¹,
Sabrina F. Velimetova¹

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

² Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

摘要

论证。目前，除采用传统方法测定大气污染物浓度外，利用卫星遥感监测大气污染物含量的方法已得到广泛应用。尽管卫星技术能够在不同地理坐标范围内获取大气污染物含量数据，但在其适用性方面仍存在疑问，尤其是在基于此类数据对居民区空气质量进行评估时。

目的。基于Sentinel-5P卫星数据分析Cherepovets市大气污染状况，并将其与地面监测数据进行比较。

方法。研究对象为Cherepovets市大气环境的地理空间数据。使用欧洲航天局Copernicus计划提供的Sentinel-5P卫星数据，并在基于Google Earth Engine云平台构建的软件环境中进行分析。同时，将卫星监测数据与PJSC«Severstal»公开的空气质量地面监测数据进行对照。

结果。在Google Earth Engine环境中基于JavaScript编写了用于分析Cherepovets市大气污染遥感数据的软件。获得了二氧化氮和二氧化硫污染的数字分布图。将卫星监测浓度评估结果与PJSC«Severstal»地面监测数据进行了比较分析。

结论。本研究开发的软件可用于构建判定性污染物（硫氧化物与氮氧化物）的大气污染数字地图。对卫星监测与地面监测所得的Cherepovets市大气污染数据差异进行了分析。

关键词：卫星监测；空气污染；地面监测；数据对比；氮氧化物；硫氧化物。

引用本文：

Tsareva SA, Lileeva EG, Tsarev YuV, Dybulina NS, Velimetova SF. 基于对地遥感数据的Cherepovets市大气污染评估. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):714–722. DOI: 10.17816/humeco678829 EDN: JRSOAX

收到: 23.04.2025

接受: 03.10.2025

发布日期: 14.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Изучение того, как информация дистанционного зондирования может дополнять или даже заменять данные, полученные с помощью наземных сетей контроля качества воздуха, представляет большой интерес. Это особенно актуально, поскольку спутниковые снимки могут предоставить региональную перспективу распределения загрязнения с течением времени и не ограничиваются определёнными географическими точками. Понимание основных закономерностей, возникающих в результате внедрения зон с низким уровнем загрязнения (Low Emission Zone), может быть особенно полезным в районах с высоким и постоянным загрязнением или с ограниченными сетями контроля качества воздуха.

А.Э. Морозова и соавт. [1] рассматривают уровень загрязнения атмосферного воздуха в пределах территории 20 крупнейших по численности городов России за 2019–2020 гг. Исходными данными исследования служат измерения TROPOMI (спутник Sentinel-5P) таких поллютантов, как оксид углерода, формальдегид, диоксид азота, диоксид серы и аэрозоли (индекс аэрозольного загрязнения). Измерения получены с помощью облачной платформы Google Earth Engine для геопространственного анализа данных, в которой представлены данные уровня L3, доступные для непосредственного анализа. Для интегральной оценки качества атмосферного воздуха разработан индекс TAQI. Авторы отмечают, что оценка уровня загрязнения атмосферы в городских условиях на основе интегральных индексов с использованием дистанционных данных (на примере TAQI) представляется перспективным подходом и может рассматриваться как важное информационное дополнение для существующих наземных измерительных систем в рамках реализации мультисенсорной парадигмы.

Группа исследователей [2] разработала физическую информационную модель глубокого обучения, которая объединяет традиционную модель атмосферного переноса химических веществ и модель глубокого обучения на основе данных. Модель использует данные наблюдений из нескольких источников загрязнения атмосферы. Точность и пространственное разрешение модели были улучшены по сравнению с исходной моделью Weather Research and Forecasting (WRF-CHEM) благодаря использованию наземных и спутниковых наблюдений. По сравнению с результатами WRF-CHEM, для модели увеличивается коэффициент корреляции для концентраций NO_2 с 0,56 до 0,80, а для концентраций озона — с 0,57 до 0,76. Авторы использовали независимый мониторинг MAXDOAS для валидации результатов измерений концентраций. В работе резюмируется, что при использовании спутникового дистанционного зондирования Земли можно получить пространственное распределение загрязняющих веществ. Благодаря объединению спутниковых данных с другими данными мониторинга и оптимизации модели

повышается точность результатов измерений и устраняется мешающее влияние облаков.

B.A. Ababio и соавт. [3] оценивали годовые концентрации $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 и O_3 в окружающем воздухе 57 городов Ганы за два десятилетия с использованием исторических и прогнозируемых данных спутниковых измерений. Авторы анализировали качество городского воздуха, канцерогенные и неканцерогенные риски для здоровья населения. Результаты показали, что годовые медианные концентрации $\text{PM}_{2.5}$ (50,79–67,97 мкг/м^3) значительно превышают рекомендуемые Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) 5 мкг/м^3 . Концентрации тропосферного озона (72,21–92,58 мкг/м^3) также превысили годовой стандарт ВОЗ в 60 мкг/м^3 . Кроме того, концентрации NO_2 (3,65–12,15 мкг/м^3) превысили порог ВОЗ в 10 мкг/м^3 во многих городах. Индексы опасности показали, что $\text{PM}_{2.5}$ и O_3 представляют значительные неканцерогенные риски для здоровья.

Разработан индекс риска множественного загрязнения воздуха для CO , NO_2 и SO_2 на основе данных дистанционного зондирования Sentinel-5P с 2019 по 2020 г. [4]. Индекс разработан путём интеграции анализов опасности, уязвимости и воздействия. Анализ опасности учитывает данные о загрязнении воздуха, полученные с помощью дистанционного зондирования, анализ уязвимости — источники загрязнения воздуха, а анализ воздействия — плотность населения. Модель множественного риска учитывает веса, полученные из взаимосвязи между параметрами опасности и уязвимости. Самые высокие значения индекса риска загрязнения воздуха наблюдались в городских районах с высоким индексом воздействия, который возникает из-за загрязнения, вызванного деятельностью человека. Анализ множественного риска трёх загрязнителей воздуха показал, что Сингапур, Вьетнам и Филиппины имеют наибольший процент зон высокого риска, в то время как Индонезия — самую большую общую площадь высокого риска (4361 км^2).

N.R. Rahimi и соавт. [5] оценивали риск для здоровья при вдыхании NO_2 и озона в различных сценариях и интерполяции пространственно-временного распределения. Данные были собраны в Тегеранском центре контроля качества воздуха, охватывающем 18 станций мониторинга с марта 2019 по февраль 2022 г. Оценки риска для здоровья (HRA) проводили для взрослых возрастных групп по трём различным сценариям воздействия (3, 8 и 12 ч). Значения индекса опасности (HI) для NO_2 и озона во всех трёх сценариях составили от 0,24 до 1,56 и от 0,04 до 0,49 соответственно. Результаты интерполяции озона, NO_x и NO_2 с использованием подхода IDW с марта 2019 по февраль 2022 г. показали, что в целом на севере и северо-востоке Тегерана наблюдались самые высокие концентрации NO_2 и NO_x , а на севере и западе — самые высокие концентрации озона. Подчёркивается, что из-за высокой плотности населения Тегерана и постоянного загрязнения воздуха крайне важно внедрить

эффективную политику контроля для защиты общественного здоровья.

Е. Dammers и соавт. [6] анализировали возможность применения метода многоисточникового шлейфа (MSPM) для оценки выбросов NO_x над Германией в период COVID-19 с 2019 по 2021 г. Авторы отмечают, что различия между спутниковыми оценками и общими данными инвентаризации составляли 75–100 кт (NO₂) NO_x (<10% от значений инвентаризации). Значительное сокращение выбросов NO_x (~15%) одновременно с карантином из-за COVID-19 наблюдалось как в инвентарных, так и в спутниковых выбросах. Исследование иллюстрирует ценность наличия последовательной спутниковой методологии для более быстрой оценки выбросов, чтобы корректировать традиционную отчётность по инвентаризации выбросов. Метод также отвечает требованию независимой проверки официальных инвентаризаций выбросов, что позволит составителям инвентаризации выявлять потенциально проблемные вопросы отчётности, укрепляя прозрачность и сопоставимость, которые являются двумя ключевыми ценностями для отчётности по выбросам.

Цель исследования. Оценка загрязнения атмосферного воздуха Череповца на основании спутниковых данных Sentinel-5P и их сопоставление с данными наземного мониторинга.

МЕТОДЫ

В качестве объекта изучения определили Череповец. В 2023 г. он оказался в перечне 33 городов, где уровень загрязнения атмосферного воздуха характеризовался значением индекса загрязнённости атмосферы, превышающим или равным 14. Общая численность населения этих городов составляет 10,1 млн человек¹. Согласно информации Росгидромета, главными загрязнителями в данном городе являются марганец, фенол, взвешенные вещества, бенз(а)пирены и диоксид азота. Череповец представляет собой важный индустриальный центр в регионе, где промышленность базируется на металлургии и химическом производстве. Здесь работают такие крупные предприятия, как Череповецкий металлургический комбинат и производитель минеральных удобрений «ФосАгро»².

Для работы применяли данные спутникового мониторинга, поступающие со спутника Sentinel-5P³. Запуск спутников этой серии обеспечивает Европейское

космическое агентство в рамках программы Европейского союза Copernicus⁴. Ключевым инструментом спутника выступает сенсор Tropomi⁵, предназначенный для обнаружения различных веществ в атмосфере, таких как формальдегид, диоксид азота, озон, диоксид серы, метан, оксид углерода и аэрозоли. Разными исследованиями показано, что измерения атмосферного столба, полученные с помощью TROPOMI, демонстрируют сильную корреляцию с наземными результатами мониторинга атмосферного воздуха, особенно в городских условиях [7–9]. Аналогичные выводы можно найти в работе, связанной с исследованием качества воздуха Мадрида [10].

Для выполнения расчётов с использованием геопространственных данных и при оценке рисков здоровью населения написано приложение на языке JavaScript в облачной среде Google Earth Engine⁶. Конвертацию концентрации загрязнителя атмосферного воздуха из единиц измерения по данным спутникового мониторинга моль/м² в мг/м³ осуществляли по формуле:

$$C = \frac{\sigma \cdot M \cdot 1000}{H}, \quad (1)$$

где C — концентрация вещества, мг/м³; σ — столбцовая концентрация вещества, моль/м²; M — молярная масса вещества, г/моль; H — атмосферного столба, м.

Для проверки адекватности определяемых с помощью спутникового мониторинга концентраций загрязнителей атмосферного воздуха использовали концентрации, получаемые с помощью постов наземного наблюдения в Череповце. ПАО «Северсталь» в рамках политики экологической открытости с осени 2024 г. выводит данные созданной сети мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце на общедоступную online-платформу⁷. Станции обеспечивают непрерывное наблюдение за качеством воздуха (измерения осуществляются каждый час) по основным загрязняющим веществам: оксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, сероводород, а также за взвешенными частицами PM_{2,5}, PM_{10,0}. В районах города размещены 6 постов (пост № 1 — район ДКС, пост № 2 — Привокзальный сквер, пост № 3 — стадион «Металлург», пост № 4 — район химико-технологического колледжа, пост № 5 — СОШ № 7, пост № 6 — аквапарк «Радужный»).

⁴ Copernicus. Europe's eyes on earth. Looking at our planet and its environment for the benefit of Europe's citizens. European Space Agency. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu/en> Дата обращения: 12.04.2025.

⁵ TROPOMI monitors trace gases and aerosols relevant for air quality and climate. European Space Agency. Режим доступа: <https://www.tropomi.eu/> Дата обращения: 12.04.2025.

⁶ Google Earth Engine. A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Google. Режим доступа: <https://earthengine.google.com> Дата обращения: 12.04.2025.

⁷ Мониторинг качества воздуха в Череповце. Череповец: ПАО «Северсталь». 2024-. Режим доступа: https://severstal.com/rus/eco-monitoring/#_blank Дата обращения: 12.04.2025.

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». Режим доступа: <https://2023.ecology-gosdoklad.ru/doklad/atmosfernyy-vozdush/kachestvo-atmosfernogo-vozdusha/> Дата обращения: 12.04.2025.

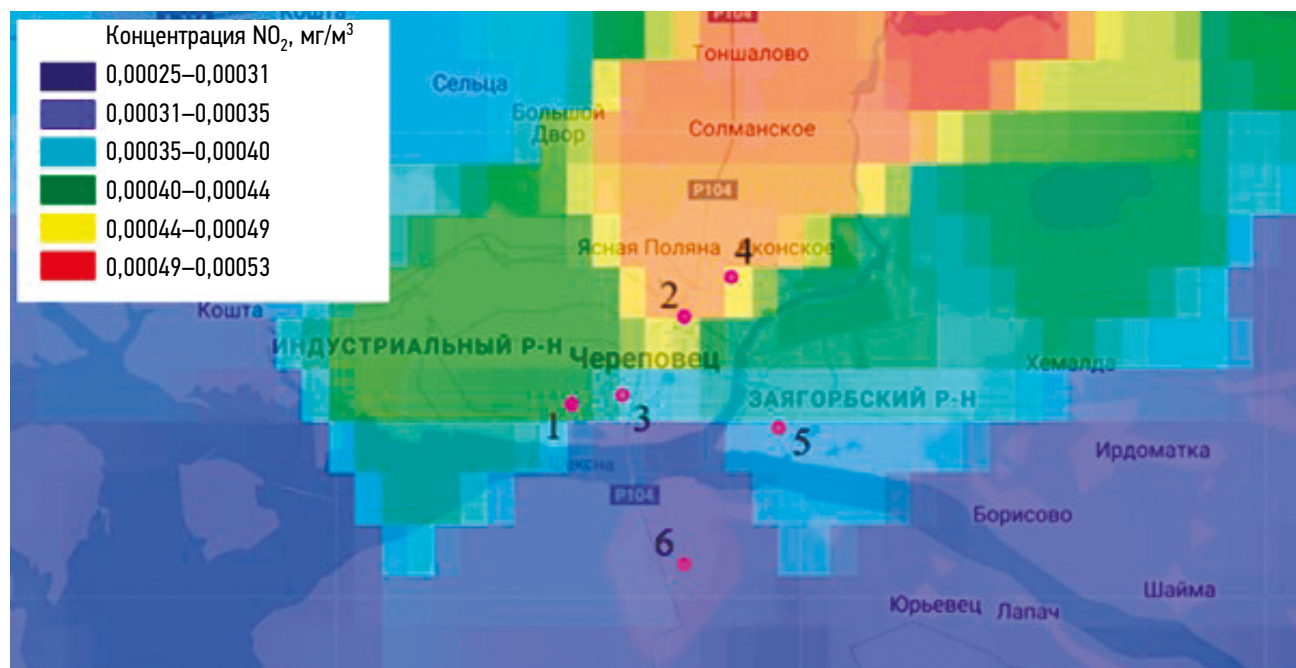
² Промышленность города. Череповец: МКУ ИМА «Череповец». 2003-. Режим доступа: <https://cherinfo.ru/32> Дата обращения: 12.04.2025.

³ Sentinel-5P. European Space Agency. Режим доступа: <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-5p> Дата обращения: 12.04.2025.

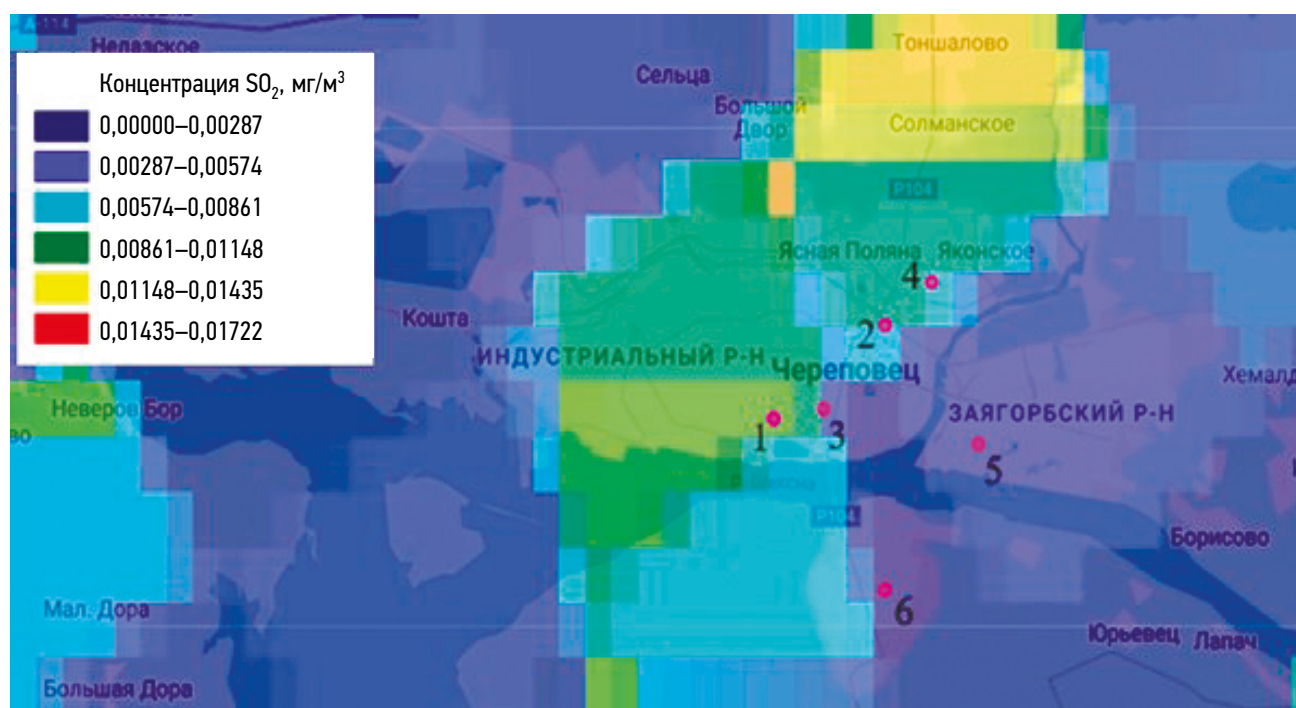
РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненного анализа спутниковых данных Sentinel-5P с использованием программного обеспечения в среде Google Earth Engine получены цифровые

карты концентраций диоксида азота, диоксида серы, озона, метана в атмосферном воздухе Череповца. Цифровые карты загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы приведены на 30 марта 2025 г. на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Цифровая карта концентрации диоксида азота (а) и диоксида серы (б) по данным спутника Sentinel-5P в районе Череповца (30.03.2025). Точками обозначены станции наземного мониторинга: 1 — пост № 1 (район ДКС), 2 — пост № 2 (Привокзальный сквер), 3 — пост № 3 (стадион Металлург), 4 — пост № 4 (район химико-технологического колледжа), 5 — пост № 5 (СОШ № 7), 6 — пост № 6 (аквапарк «Радужный»).

Fig. 1. Digital map of nitrogen dioxide (a) and sulfur dioxide (b) levels in Cherepovets according to Sentinel-5P satellite data (as of March 30, 2025). Dots indicate Earth-based monitoring stations: 1, station No. 1 (Stroitel Community Center); 2, station No. 2 (Privokzalny Square); 3, station No. 3 (Metallurg Stadium); 4, station No. 4 (Chemical Engineering College); 5, station No. 5 (Secondary School No. 7); 6, station No. 6 (Raduzhny Waterpark).

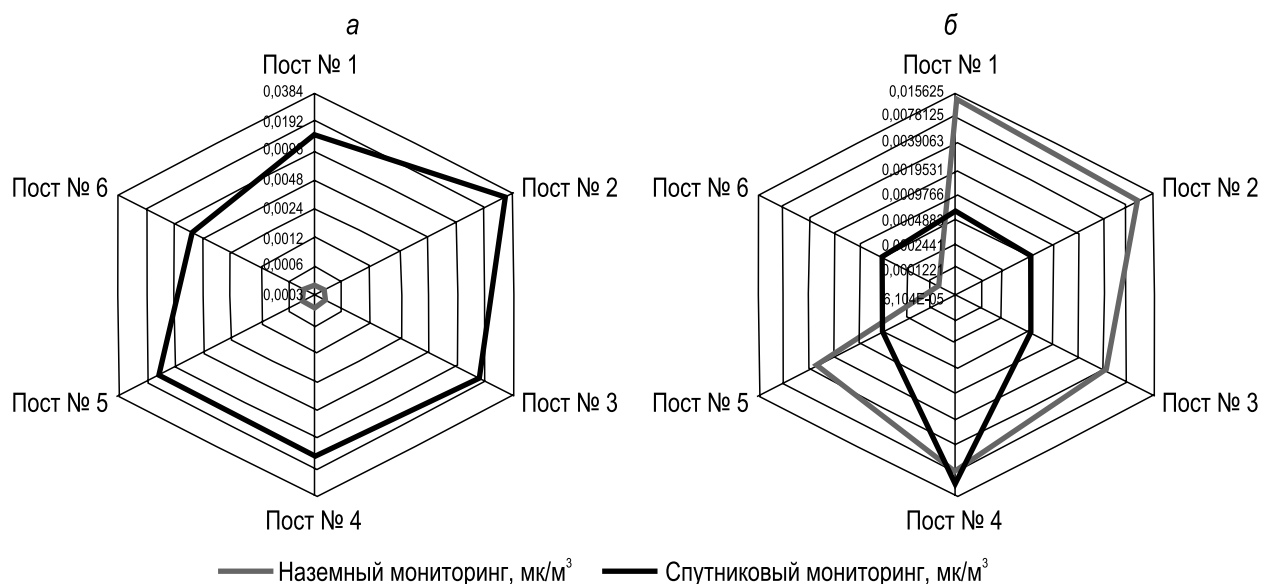


Рис. 2. Значения концентраций диоксида азота (а) и диоксида серы (б), полученные путём наземного и спутникового мониторинга (30.03.2025).
Fig. 2. Nitrogen dioxide (a) and sulfur dioxide (b) levels according to Earth-based and satellite monitoring (as of March 30, 2025).

Для сопоставления концентраций диоксида азота и серы в атмосферном воздухе Череповца, полученных по данным спутникового мониторинга, использовали данные открытого сервиса наземного мониторинга качества атмосферного воздуха в Череповце, предоставляемого ПАО «Северсталь». Значения концентраций диоксида азота и диоксида серы, полученные путём наземного и спутникового мониторинга для шести постов наблюдения, приведены на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровые карты концентраций загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота и диоксидом серы по данным спутника Sentinel-5P в районе Череповца за 30 марта 2025 г. (см. рис. 1), позволяют заключить, что основная часть воздушного пространства города подвержена интенсивному воздействию загрязнителей. По диоксиду азота в атмосферном воздухе наблюдаются концентрации свыше $4,0 \cdot 10^{-4}$ мг/м³, а по диоксиду серы — свыше $8,6 \cdot 10^{-4}$ мг/м³. Исключением является Зашекснинский район города, где концентрации диоксида азота составляют менее $3,5 \cdot 10^{-4}$ мг/м³, а диоксида серы менее $8,6 \cdot 10^{-4}$ мг/м³. По состоянию на 30 марта 2025 г. в Череповце наблюдалось юго-западное направление ветра, поэтому зона загрязнения атмосферного воздуха рассматриваемыми поллютантами сдвигается на северо-восток от города, в сторону населённых пунктов Солманское, Тоншалово.

Заключительным этапом исследования является сопоставление концентраций диоксида азота и серы, полученных наземным и спутниковым мониторингом (см. рис. 2). Возможные причины расхождений данных спутникового и наземного мониторинга могут объясняться

тем, что спутниковые данные представляют собой усреднённые значения для ячеек размером 7 км², в то время как наземные станции фиксируют концентрацию загрязняющих веществ в конкретной точке, что особенно важно для промышленных зон, в которых уровни загрязнения могут сильно меняться на небольших расстояниях из-за локальных выбросов. Примечательными являются различия в концентрациях NO₂, измеренных при спутниковых наблюдениях и наземном мониторинге (см. рис. 2а). При спутниковом мониторинге в ходе построения цифровых карт загрязнения атмосферного воздуха мы использовали профили столбцовой концентрации вещества (моль/м²). Столбцовая концентрация изменяется по высоте атмосферного столба. В слое атмосферы у поверхности земли она максимальная, а при подъёме над поверхностью земли значение столбцовой концентрации вещества в атмосферном воздухе уменьшается. В расчётах принимали среднее значение по всей высоте атмосферного столба. Высота источника выброса загрязнителей атмосферного воздуха также может вносить определённый вклад. Это, в частности, определяет различие между данными концентраций спутникового наблюдения и наземного мониторинга диоксида азота и серы. Выбросы диоксида азота в атмосферный воздух определяются в большей степени наземным транспортом, что и фиксируется по максимуму постами наблюдения, расположенными у поверхности земли. При спутниковом наблюдении эта концентрация усредняется по высоте атмосферного столба и даёт меньшие значения. Выбросы диоксида серы в атмосферный воздух дают в основном промышленные объекты, которые осуществляют выброс через трубы на определённой высоте от поверхности земли (10–50 м). При выбросе происходит диффузионное рассеяние загрязнителя в атмосферном воздухе, и температура выбрасываемой смеси,

температура окружающего воздуха, высота источника выброса определяют то, как будет распределяться загрязнитель в атмосферном воздухе. Это наглядно демонстрируют данные измерения на постах концентрации SO_2 . На посту № 4 наблюдаются максимальные значения концентраций. Это определяется метеоусловиями на момент измерения концентрации диоксида серы: направление ветра юго-западное. Данный пост как раз располагается в северо-восточной части города от ПАО «Северсталь», что и определяет максимальные концентрации для этого поста наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спутникового и наземного мониторингов позволил выявить сильные и слабые стороны каждого метода. Спутниковый мониторинг охватывает большие территории, включая труднодоступные зоны, но имеет низкое пространственное разрешение, зависит от погоды и имеет временные лаги, что может приводить к занижению локальных пиков загрязнения. Наземный же мониторинг обеспечивает высокую точность измерений в конкретных точках и непрерывный сбор данных, но имеет ограниченный охват и высокую стоимость, что затрудняет мониторинг в удалённых районах. Совместное использование методов позволит повысить точность спутниковых данных благодаря их калибровке с помощью наземных измерений, а также оперативно выявлять источники выбросов, заполняя пробелы наземного мониторинга. Комбинированный подход позволит более эффективно использовать преимущества обоих методов и скомпенсирует их недостатки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Царева — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; Е.Г. Лилеева — анализ данных, подготовка и написание текста статьи; Ю.В. Царев — написание кода программного обеспечения на языке JavaScript в среде Google Earth Engine, анализ геопространственных данных; Н.С. Дыбулина — подготовка и написание текста статьи; С.Ф. Велиметова — сбор и анализ литературных источников. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо, т.к. проводилась оценка загрязнения атмосферного воздуха на основании спутниковых данных и наземного мониторинга.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

Благодарность. Авторы выражают признательность компании ПАО «Северсталь» за предоставленные данные наземного мониторинга критерияльных загрязнителей атмосферного воздуха Череповца, Европейскому космическому агентству за предоставленные данные спутника Sentinel-5P, компании Google за предоставленный облачный сервис Google Earth Engine.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: S.A. Tsareva: investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; E.G. Lileeva: formal analysis, writing—original draft; Yu.V. Tsarev: software, formal analysis; N.S. Dybulina: writing—original draft; S.F. Velimetova: investigation, formal analysis. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable, because an assessment of atmospheric air pollution was carried out based on satellite data and ground-based monitoring.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Severstal for providing access to Earth-based monitoring data on atmospheric pollution by criteria pollutants in Cherepovets; the European Space Agency for providing access to Sentinel-5P satellite data; and Google for providing access to Google Earth Engine.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Morozova AE, Sizov OS, Elagin PO, et al. Integrated assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022;19(4):23–39. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39 EDN: AKKSYT
- Li B, Hu Q, Gao M, et al. Physical informed neural network improving the WRF-CHEM results of air pollution using satellite-based remote sensing data. *Atmospheric Environment*. 2023;311:120031. doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.120031

3. Ababio BA, Ashong GW, Agyekum ThP, et al. Comprehensive health risk assessment of urban ambient air pollution (PM_{2.5}, NO₂ and O₃) in Ghana. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2025;289:117591. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117591
4. Sakti AD, Anggraini TS, Ihsan KTN, et al. Multi-air pollution risk assessment in Southeast Asia region using integrated remote sensing and socio-economic data products. *Sci Total Environ.* 2023;854:158825. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158825
5. Rahimi NR, Azhdarpoor A, Fouladi-Fard R. Exposure to tropospheric ozone and NO₂ in the ambient air of Tehran metropolis: Spatiotemporal distribution and inhalation health risk assessment. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C.* 2024;136:103777. doi: 10.1016/j.pce.2024.103777
6. Dammers E, Tokaya J, Mielke C, et al. Can TROPOMI NO₂ satellite data be used to track the drop in and resurgence of NO_x emissions in

Germany between 2019–2021 using the multi-source plume method (MSPM)? *Geosci Model Dev.* 2024;17(12):4983–5007. doi: 10.5194/gmd-17-4983-2024 EDN: BALSGF

7. Cersosimo A, Serio C, Masiello G. TROPOMI NO₂ tropospheric column data: regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations. *Remote Sensing.* 2020;12(14):2212. doi: 10.3390/rs12142212
8. Goldberg DL, Anenberg SC, Kerr GH, et al. TROPOMI NO₂ in the United States: a detailed look at the annual averages, weekly cycles, effects of temperature, and correlation with surface NO₂ concentrations. *Earth's Future.* 2021;9(4):e2020EF001665. doi: 10.1029/2020EF001665
9. Jeong U, Hong H. Assessment of tropospheric concentrations of NO₂ from the TROPOMI/Sentinel-5 precursor for the estimation of long-term exposure to surface NO₂ over South Korea. *Remote Sens.* 2021;13(10):1877. doi: 10.3390/rs13101877

ОБ АВТОРАХ

* **Царева Софья Александровна**, канд. хим. наук, доцент;
адрес: Россия, 150000, Ярославль, Московский пр-кт, д. 88, каб. 920;
ORCID: 0000-0003-2099-4885;
eLibrary SPIN: 5279-4175;
e-mail: zarew@rambler.ru

Лилеева Елена Георгиевна, канд. мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-6048-8974;
eLibrary SPIN: 4287-6652;
e-mail: elileeva2006@yandex.ru

Царев Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент;
ORCID: 0000-0002-4337-2897;
eLibrary SPIN: 7991-3530;
e-mail: tsarevyy@ystu.ru

Дыбулина Наталия Сергеевна;
ORCID: 0009-0006-4139-639X;
eLibrary SPIN: 2758-5320;
e-mail: dybulinans@gmail.com.

Велиметова Сабрина Фаиковна;
ORCID: 0009-0007-7891-2682;
e-mail: sabrinavelimetova@icloud.com

AUTHORS' INFO

* **Sophia A. Tsareva**, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor;
address: 88 Moskovsky ave, room 920, Yaroslavl, Russia, 150000;
ORCID: 0000-0003-2099-4885;
eLibrary SPIN: 5279-4175;
e-mail: zarew@rambler.ru

Elena G. Lileeva, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-6048-8974;
eLibrary SPIN: 4287-6652;
e-mail: elileeva2006@yandex.ru

Yuri V. Tsarev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
ORCID: 0000-0002-4337-2897;
eLibrary SPIN: 7991-3530;
e-mail: tsarevyy@ystu.ru

Nataliya S. Dybulina;
ORCID: 0009-0006-4139-639X;
eLibrary SPIN: 2758-5320;
e-mail: dybulinans@gmail.com.

Sabrina F. Velimetova;
ORCID: 0009-0007-7891-2682;
e-mail: sabrinavelimetova@icloud.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Взаимосвязь между уровнем множественной химической чувствительности и выраженностью симптомов токсической нагрузки

Е.В. Болотова¹, В.В. Оноприев¹, Л.В. Батракова¹, А.Г. Абраменко¹, И.Г. Павельев^{1,2}

¹ Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия;

² Кубанский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Воздействие факторов окружающей среды, включая низкие концентрации химических веществ, связано с развитием множественной химической чувствительности и симптомов токсической нагрузки, что представляет значимую проблему для общественного здоровья.

Цель. Изучение и количественная оценка взаимосвязи между уровнем множественной химической чувствительности, измеряемым опросником Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (QEESI), и выраженностью симптомов токсической нагрузки, оцениваемой по Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ), у жителей Краснодарского края.

Методы. В поперечном исследовании проанализированы данные 50 пользователей веб-платформы «ЭкоМедик», заполнивших опросники QEESI и MSQ. Средний возраст участников — 42,3±10,5 года, 68% выборки составили женщины. Статистический анализ включал описательную статистику и корреляционный анализ Спирмена.

Результаты. Средний общий балл QEESI составил 102,06±35,29, MSQ — 80,06±24,28. Выявлена значимая положительная корреляция между общими баллами QEESI и MSQ ($r=0,649$, $p < 0,001$). Категория «другие симптомы» MSQ показала умеренную корреляцию с общим баллом QEESI ($r=0,283$, $p=0,046$).

Заключение. Полученные результаты подтверждают связь между множественной химической чувствительностью и токсической нагрузкой, подчёркивая ценность для скрининга опросников QEESI и MSQ, которые могут быть использованы в разработке стратегий диагностики и лечения в экологической медицине.

Ключевые слова: множественная химическая чувствительность; QEESI; Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ); экологическая медицина; токсическая нагрузка; корреляционный анализ.

Как цитировать:

Болотова Е.В., Оноприев В.В., Батракова Л.В., Абраменко А.Г., Павельев И.Г. Взаимосвязь между уровнем множественной химической чувствительности и выраженностью симптомов токсической нагрузки // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 723–734. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco680409>
EDN: LOMNXL

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco680409>

EDN: LOMNXL

Association Between Multiple Chemical Sensitivity and Toxic Load Symptom Severity

Elena V. Bolotova¹, Vladimir V. Onopriev¹, Lubov V. Batrakova¹, Arina G. Abramenko¹, Igor G. Paveliev^{1,2}

¹ Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia;

² Kuban State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Krasnodar, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Exposure to environmental factors, including low concentrations of chemical substances, is associated with the development of multiple chemical sensitivity and symptoms of toxic load, representing an important public health issue.

AIM: This study aimed to examine and quantitatively assess the association between the level of multiple chemical sensitivity measured using the Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (QEESI) and the severity of toxic load symptoms assessed by the Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ) among residents of the Krasnodar Territory.

METHODS: A cross-sectional study analyzed data from 50 users of the EcoMedik web platform who completed the QEESI and MSQ questionnaires. The mean age of participants was 42.3 ± 10.5 years; 68% were women. Statistical analysis included descriptive statistics and Spearman correlation analysis.

RESULTS: The mean total QEESI score was 102.06 ± 35.29 and the mean MSQ score was 80.06 ± 24.28 . A significant positive correlation was found between total QEESI and MSQ scores ($r = 0.649$, $p < 0.001$). The MSQ “other symptoms” category showed moderate correlation with the total QEESI score ($r = 0.283$, $p = 0.046$).

CONCLUSION: The findings confirm an association between multiple chemical sensitivity and toxic load, highlighting the value of QEESI and MSQ as screening tools that can be used in developing diagnostic and therapeutic strategies in environmental medicine.

Keywords: multiple chemical sensitivity; QEESI; Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ); environmental medicine; toxic load; correlation analysis.

To cite this article:

Bolotova EV, Onopriev VV, Batrakova LV, Abramenko AG, Paveliev IG. Association Between Multiple Chemical Sensitivity and Toxic Load Symptom Severity. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):723–734. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco680409> EDN: LOMNXL

Received: 25.05.2025

Accepted: 15.09.2025

Published online: 28.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco680409>

EDN: LOMNXL

多重化学敏感性水平与毒性负荷症状严重性之间的关系

Elena V. Bolotova¹, Vladimir V. Onopriev¹, Lubov V. Batrakova¹, Arina G. Abramenko¹, Igor G. Paveliev^{1,2}

¹ Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia;

² Kuban State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Krasnodar, Russia

摘要

论证。环境因素暴露，包括低浓度化学物质，与多重化学敏感性及毒性负荷症状的发生密切相关，已成为公共健康领域的重要问题。

目的。分析并定量评估Krasnodar Region居民中，多重化学敏感性水平，由Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (QEESI)评估，以及毒性负荷症状严重程度，由Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ)评估之间的关系。

方法。开展横断面研究，分析50名“EcoMedic”网络平台用户填写的QEESI与MSQ问卷数据。参与者平均年龄为 42.3 ± 10.5 岁，其中女性占68%。统计分析包括描述性统计与Spearman相关分析。

结果。QEESI总分为 102.06 ± 35.29 ，MSQ总分为 80.06 ± 24.28 。QEESI总分与MSQ总分之间存在显著正相关（ $r=0.649$ ， $p<0.001$ ）。MSQ中“其他症状”类别与QEESI总分呈中度相关（ $r=0.283$ ， $p=0.046$ ）。

结论。本研究结果证实多重化学敏感性与毒性负荷水平之间存在联系，并强调QEESI与MSQ问卷在筛查中的价值，这些工具可用于生态医学中相关策略的制定。

关键词：多重化学敏感性；QEESI；Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ)；生态医学；毒性负荷；相关分析。

引用本文：

Bolotova EV, Onopriev VV, Batrakova LV, Abramenko AG, Paveliev IG. 多重化学敏感性水平与毒性负荷症状严重性之间的关系. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):723–734. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco680409> EDN: LOMNXL

收到: 25.05.2025

接受: 15.09.2025

发布日期: 28.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Современный мир сталкивается с нарастающим воздействием факторов окружающей среды, среди которых химические вещества занимают одно из центральных мест в развитии хронических неинфекционных заболеваний. Множественная химическая чувствительность (МХЧ) представляет собой сложное состояние, при котором низкие концентрации химических агентов, таких как парфюмерия, пестициды или бытовые чистящие средства, вызывают неспецифические симптомы, включая головные боли, хроническую усталость и когнитивные нарушения [1]. Концепция токсической нагрузки дополняет эту картину, подчёркивая, что накопление токсинов в организме может приводить к системным нарушениям, усиливая проявления МХЧ и влияя на различные системы организма [2].

Распространённость МХЧ, по разным оценкам, варьирует от 0,5–6,3% при использовании строгих диагностических критериев до 9–33% при самооценке, причём женщины и лица среднего возраста (40–50 лет) составляют основную группу риска [3]. Отсутствие объективных биомаркёров усложняет диагностику МХЧ, что делает стандартизированные опросники, такие как Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (QEESI) и Medical Symptom/Toxicity Questionnaire (MSQ), незаменимыми инструментами для оценки состояния пациентов [3].

QEESI демонстрирует высокую надёжность и валидность в различных популяциях [4, 5]. Однако он фокусируется на предрасположенности к МХЧ и не отражает полного спектра текущих симптомов, которые могут быть вызваны не только химической чувствительностью, но и общей токсической нагрузкой, воспалительными процессами или метаболическими нарушениями. Здесь на помощь приходит MSQ, который охватывает 15 категорий симптомов (около 70 отдельных проявлений), таких как неврологические, респираторные, желудочно-кишечные и эмоциональные нарушения, позволяя детализировать клиническую картину и оценивать актуальное состояние здоровья пациента [2].

Совместное использование QEESI и MSQ открывает новые возможности для комплексной оценки состояния пациентов. QEESI позволяет выявить уровень чувствительности к триггерам, тогда как MSQ даёт представление о выраженности и характере симптомов, что особенно важно для дифференциальной диагностики, мониторинга эффективности лечения и понимания патофизиологических механизмов. Например, анализ категорий симптомов MSQ помогает определить, какие системы организма страдают больше всего, выявить специфические паттерны, связанные с типами химического воздействия, и отследить динамику состояния пациента в процессе лечения. Такой подход не только объективизирует субъективные жалобы, но и способствует персонализации лечения, позволяя корректировать терапевтические стратегии на основе изменений в конкретных категориях симптомов.

Несмотря на многочисленные исследования, подтверждающие связь МХЧ с выраженностью клинических симптомов, данные о взаимосвязи между QEESI и MSQ остаются малоизученными [6]. Краснодарский край представляет особый интерес для изучения данной проблемы с учётом его экологических особенностей. Являясь одним из ведущих аграрных регионов России, край характеризуется интенсивным использованием пестицидов и агрохимикатов. Кроме того, развитая транспортная сеть, промышленные предприятия и портовые комплексы создают значительную антропогенную нагрузку, что в совокупности с климатическими факторами может усиливать токсическое воздействие на население. Платформа «ЭкоМедик», разработанная при финансовой поддержке Кубанского научного фонда (грант НИП 20.1/67), предоставляет уникальную базу данных для анализа здоровья населения региона, что делает возможным проведение такого исследования.

Для реализации цели исследования и подтверждения гипотезы определили распределение общих баллов QEESI и MSQ в выборке, провели корреляционный анализ между общими баллами QEESI и MSQ, исследовали взаимосвязи между доступными разделами QEESI и общим баллом MSQ, изучили корреляции между общим баллом QEESI и категориями симптомов MSQ, выявили связи между категориями MSQ и общим баллом QEESI, а также между доступными разделами QEESI и категориями MSQ.

Данные литературы свидетельствуют, что клиническая картина МХЧ часто включает неврологические, когнитивные и эмоциональные нарушения [7, 8]. Это послужило основанием для выдвижения следующей гипотезы: уровень МХЧ (QEESI) положительно коррелирует с выраженностью симптомов токсической нагрузки (MSQ), эта взаимосвязь может быть особенно выраженной для определённых категорий симптомов, таких как неврологические или эмоциональные.

Цель исследования. Изучение и количественная оценка взаимосвязи между уровнем МХЧ, измеряемым опросником QEESI, и выраженностью симптомов токсической нагрузки, оцениваемой по MSQ, у жителей Краснодарского края.

МЕТОДЫ

Исследование выполнено в формате поперечного одномоментного анализа, что позволило оценить взаимосвязь между уровнем МХЧ и выраженностью симптомов токсической нагрузки в определённый момент времени. Такой дизайн выбран для получения первичных данных о корреляции между переменными в условиях ограниченного доступа к лонгитюдным данным.

Исследование базировалось на анонимизированных данных, собранных через веб-платформу «ЭкоМедик», которая предоставляет пользователям возможность заполнять опросники QEESI и MSQ для оценки состояния

здоровья. Исследование одобрено на заседании независимого этического комитета ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России (протокол № 126 от 05.10.2023). Все участники предоставили информированное согласие на использование их анонимизированных данных в исследовательских целях. Данные собраны в период с января по март 2025 г. через веб-платформу «ЭкоМедик».

Критерии включения: в выборку вошли пользователи, проживающие в Краснодарском крае, полностью заполнившие опросники QEESI и MSQ.

Критерии исключения: из анализа исключали записи с неполными данными, в том числе пропуски в ключевых переменных (общие баллы QEESI и MSQ, категории симптомов MSQ).

Демографические характеристики участников представлены в табл. 1.

Используемые инструменты

QEESI. Опросник разработан для оценки уровня множественной химической чувствительности и включает пять шкал: Chemical Intolerance Index (химическая непереносимость); Other Intolerance Index (другие непереносимости); Symptom Index (тяжесть симптомов); Environmental Background Index (индекс экологического фона); Impact on Life Index (влияние на жизнь).

Общий балл QEESI рассчитывается как сумма баллов по шкалам и находится в диапазоне от 0 до 400. Опросник обладает высокими надёжностью (Cronbach's alpha 0,74–0,95) и валидностью, подтверждёнными в международных и российских исследованиях [4, 9]. Для настоящего исследования использовалась русскоязычная версия опросника, прошедшая процедуру перевода и валидации на выборке 468 пациентов. Процедура включала прямой и обратный перевод, предварительное тестирование и оценку надёжности. Коэффициент альфа-Кронбаха для основных шкал показал высокую степень внутренней согласованности: 0,78 для непереносимости ингаляционных химических веществ; 0,80 — для тяжести симптомов; 0,87 — для влияния на жизнь, что подтверждает надёжность и валидность адаптированной версии [5].

MSQ. Предназначен для оценки выраженности симптомов токсической нагрузки и включает около 70 вопросов, сгруппированных в 15 категорий: голова, глаза, нос, горло, кожа, сердце, лёгкие, пищеварение, суставы/мышцы, вес, активность, центральная нервная система (ЦНС), эмоции, другие симптомы, а также энергия/общая активность. Каждая категория оценивает интенсивность симптомов по шкале от 0 (отсутствие симптома) до 4 (максимальная выраженность). Общий балл MSQ варьирует от 0 до 280, что позволяет количественно измерить степень токсической нагрузки [2]. Опросник разработан Институтом функциональной медицины (США) и широко применяется в международной клинической практике. В данном исследовании использовалась адаптированная нами русскоязычная версия. На момент проведения

Таблица 1. Демографические характеристики выборки
Table 1. Demographic characteristics of the sample

Характеристика	Значение
Размер выборки, <i>n</i>	50
Возраст, лет (<i>M</i> ± <i>SD</i>)	42,3±10,5
Пол, женщины, %	68
География	Краснодарский край

работы публикаций, посвящённых официальной валидации русскоязычной версии MSQ, не было найдено.

Корреляционный анализ

Перед анализом полученные данные были очищены и подготовлены. Пропуски в столбцах отсутствовали, что подтвердилось при проверке. Для устранения влияния выбросов в переменной, содержащей общий балл QEESI, значения, превышающие верхнюю границу ($Q3+1,5\times IQR$), были ограничены этой границей (метод «каппинга»). Здесь IQR (Interquartile Range) — межквартильный размах, рассчитываемый как разница между 75-м ($Q3$) и 25-м ($Q1$) квартилями. Таким образом, любое значение выше $Q3+1,5\times IQR$ заменялось значением этой границы. Все количественные переменные, включая общие баллы и категории симптомов, были преобразованы в числовой формат с использованием функции `pd.to_numeric` с параметром `errors=coerce` для обработки возможных некорректных значений.

Для анализа взаимосвязей были выбраны релевантные переменные: общие баллы QEESI и MSQ, категории симптомов MSQ, а также созданная категориальная переменная, разделяющая участников на группы с высоким и низким уровнем QEESI на основе медианного значения (медиана — 95,0).

Дополнительно для анализа корреляции между раздѐлами QEESI и общим баллом MSQ использовали данные из файла «данные.xlsx». В этом файле содержались значения для шкал QEESI: Chemical Intolerance Index, Other Intolerance Index, Symptom Index, Environmental Background Index, Impact on Life Index. Пропуски в столбце Environmental Background Index (одно значение) были импутированы средним значением по этому столбцу, а все столбцы преобразованы в числовой формат.

Анализ статистических данных проводили с использованием языка программирования Python и библиотек `pandas` (работа с данными), `scipy` (статистические тесты), `matplotlib` и `seaborn` (визуализация). Для количественных переменных (общие баллы QEESI и MSQ, категории симптомов MSQ) были рассчитаны среднее арифметическое, стандартное отклонение, медиана, нижний (25%) и верхний (75%) квартили. Для категориальных данных (пол, группы QEESI) определены частоты и процентные доли. Нормальность распределения данных проверяли с помощью теста Шапиро–Уилка, который выбран из-за его

высокой чувствительности в малых выборках. Учитывая скошенное распределение данных ($p < 0,05$ по тесту Шапиро–Уилка), для анализа взаимосвязей применяли непараметрический метод Спирмена. Исследовали следующие корреляции: между общими баллами QEESI и MSQ; между доступными разделами QEESI (из файла «данные.xlsx») и общим баллом MSQ; между общим баллом QEESI и 15 категориями симптомов MSQ; между категориями MSQ и общим баллом QEESI, а также между доступными разделами QEESI и категориями MSQ (в ограниченном объёме из-за отсутствия данных по шкалам в основном наборе).

Для оценки различий в выраженности симптомов между группами с высоким и низким уровнем QEESI применяли U -критерий Манна–Уитни, подходящий для ненормального распределения данных. Во всех тестах статистическую значимость определяли на уровне $p < 0,05$.

Методы и процедуры анализа были выбраны с учётом особенностей данных, что обеспечило надёжность и воспроизводимость результатов, несмотря на ограничения выборки.

Общие баллы по опросникам QEESI и MSQ были рассчитаны для всей выборки (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение баллов проанализировали с использованием теста Шапиро–Уилка, который показал статистически значимое отклонение от нормального распределения для обеих шкал: для QEESI — $p < 0,001$, для MSQ — $p = 0,035$. Гистограммы (рис. 1) подтвердили ненормальное распределение данных, демонстрируя правую асимметрию, особенно выраженную для QEESI. Выявлен (рис. 2) выброс в данных QEESI (значение около 219),

Таблица 2. Описательная статистика общих баллов QEESI и MSQ

Table 2. Descriptive statistics for total QEESI and MSQ scores

Показатель	QEESI	MSQ
Количество, n	50	50
Среднее $\pm$ SD	102,06 $\pm$ 35,29	80,06 $\pm$ 24,28
Медиана	95,00	79,50
Мин–макс	53–219	40–143
25% и 75% квантили	79,25–116,75	60,00–96,75

что указывает на наличие участников с экстремально высоким уровнем МХЧ.

Гистограммы и линии плотности иллюстрируют распределение общего балла QEESI (слева) и общего балла Symptom Scale (справа). Ось X представляет собой общий балл, а ось Y — частоту наблюдений.

С учётом ненормального распределения данных для корреляционного анализа был применён непараметрический метод Спирмена. Анализ проводили на нескольких уровнях.

1. *Корреляция между общими баллами QEESI и MSQ.* Выявлена значимая положительная корреляция между общими баллами QEESI и MSQ ($r = 0,649$, $p < 0,001$). Этот результат указывает на умеренно-сильную связь между уровнем МХЧ и выраженностью симптомов токсической нагрузки. Диаграмма рассеяния с линией регрессии (рис. 3) демонстрирует линейную тенденцию, подтверждая, что более высокие баллы QEESI ассоциированы с более выраженными симптомами по MSQ.

2. *Корреляция между разделами QEESI и общим баллом MSQ.* Для анализа корреляции между разделами QEESI и общим баллом MSQ были использованы данные из файла «данные.xlsx». Корреляции рассчитаны

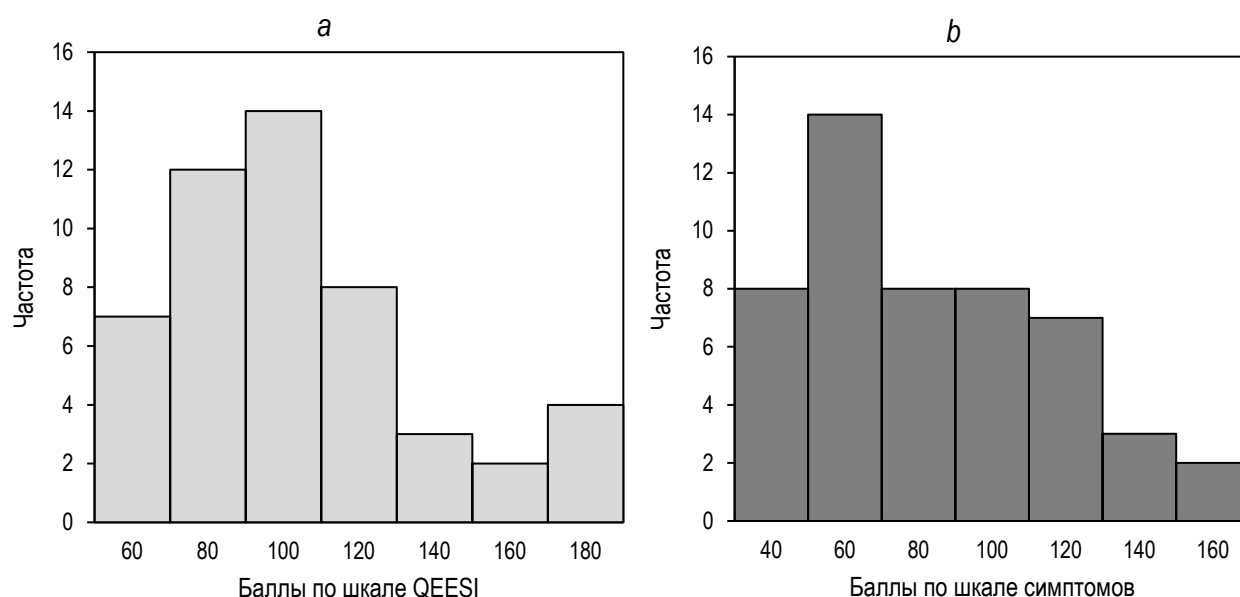


Рис. 1. Распределение общего балла QEESI (a) и общего балла Symptom Scale (b).

Fig. 1. Distribution of total QEESI (a) and total Symptom Scale scores (b).

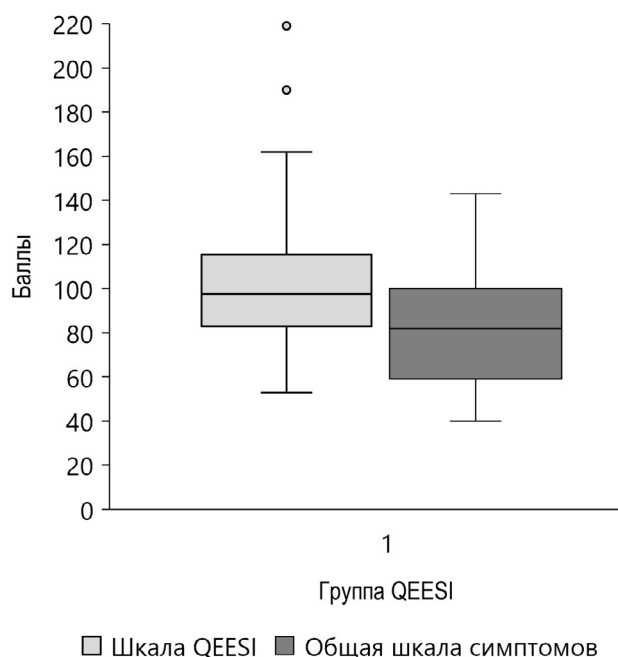


Рис. 2. Боксплот общего балла QEEI и общего балла MSQ (Symptom Scale)

Fig. 2. Boxplot total QEEI score and total MSQ (Symptom Scale) score.

методом Спирмена. Chemical Intolerance Index и общий балл MSQ: $r=0,012$ ($p > 0,05$); Other Intolerance Index и общий балл MSQ: $r=-0,044$ ($p > 0,05$); Symptom Index и общий балл MSQ: $r=-0,053$ ($p > 0,05$); Environmental Background Index и общий балл MSQ: $r=-0,311$ ($p < 0,05$); Impact on Life Index и общий балл MSQ: $r=-0,088$ ($p > 0,05$). Наиболее значимая корреляция наблюдается между Environmental Background Index и общим баллом MSQ ($r=-0,311$, $p < 0,05$), что указывает на умеренную отрицательную связь. Остальные корреляции оказались слабыми и статистически незначимыми. Дополнительно была выявлена сильная положительная корреляция между Other Intolerance Index и Symptom Index ($r=0,65$, $p < 0,001$), что указывает на связь между непереносимостью различных факторов

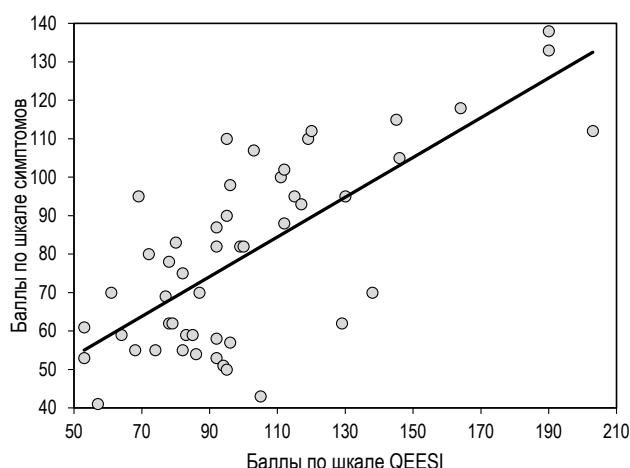


Рис. 3. Диаграмма рассеяния демонстрирует положительную корреляцию между общим баллом QEEI (ось X) и общим баллом MSQ (ось Y).

Fig. 3. Scatter plot demonstrating a positive correlation between total QEEI score (X-axis) and total MSQ score (Y-axis).

Таблица 3. Корреляции между общим баллом QEEI и категориями MSQ

Table 3. Correlations between total QEEI score and MSQ categories

Категория MSQ	Коэффициент корреляции (r)	p-значение
Другие симптомы	0,283	0,046
Голова	0,247	0,083
Центральная нервная система	0,145	0,314
Пищеварение	0,020	0,893

(например, пищи или лекарств) и выраженностью симптомов в рамках QEEI. Эти взаимосвязи отражены на тепловой карте (рис. 4).

3. *Корреляция между общим баллом QEEI и категориями MSQ.* Анализ взаимосвязей между общим баллом QEEI и 15 категориями симптомов MSQ выявил значимую корреляцию только для категории «другие симптомы» ($r=0,283$, $p=0,046$), что указывает на умеренную положительную связь. Для остальных категорий корреляции оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$). Более подробные данные представлены в табл. 3.

4. *Корреляция между категориями MSQ и общим баллом QEEI.* Из-за отсутствия данных о шкалах QEEI в основном наборе данных была построена корреляционная матрица между категориями MSQ и общим баллом QEEI. Тепловая карта (рис. 5) показала, что наиболее выраженные корреляции наблюдаются внутри категорий MSQ: между «активностью» и «весом» ($r=0,71$, $p < 0,001$), а также между «пищеварением» и «весом» ($r=0,66$, $p < 0,001$). Корреляции между категориями MSQ и общим баллом QEEI оставались слабыми ($r \leq 0,28$).

Для оценки различий в выраженности симптомов участников разделили на две группы на основе медианного значения QEEI (медиана — 95,0): группа с высоким уровнем МХЧ (QEEI ≥ 95) и группа с низким уровнем МХЧ (QEEI < 95). Непараметрический U-критерий Манна-Уитни показал значимые различия в общем балле MSQ между группами ($U=531$, $p < 0,05$). Группа с высоким уровнем QEEI продемонстрировала более высокую выраженность симптомов по сравнению с группой с низким уровнем, что визуально подтверждено диаграммой «ящик с усами» (рис. 6).

Выбросы, выявленные в данных QEEI (например, значение 219), указывают на гетерогенность выборки и возможное наличие участников с тяжёлыми формами МХЧ. После ограничения выбросов (метод «каппинга» на уровне $Q3+1,5 \times IQR$) результаты корреляционного анализа остались устойчивыми, что подтверждает надёжность выводов. Отсутствие пропущенных значений в ключевых переменных основного набора данных позволило сохранить полный объём выборки для анализа.

Полученные результаты демонстрируют связь между уровнем МХЧ и выраженностью симптомов токсической

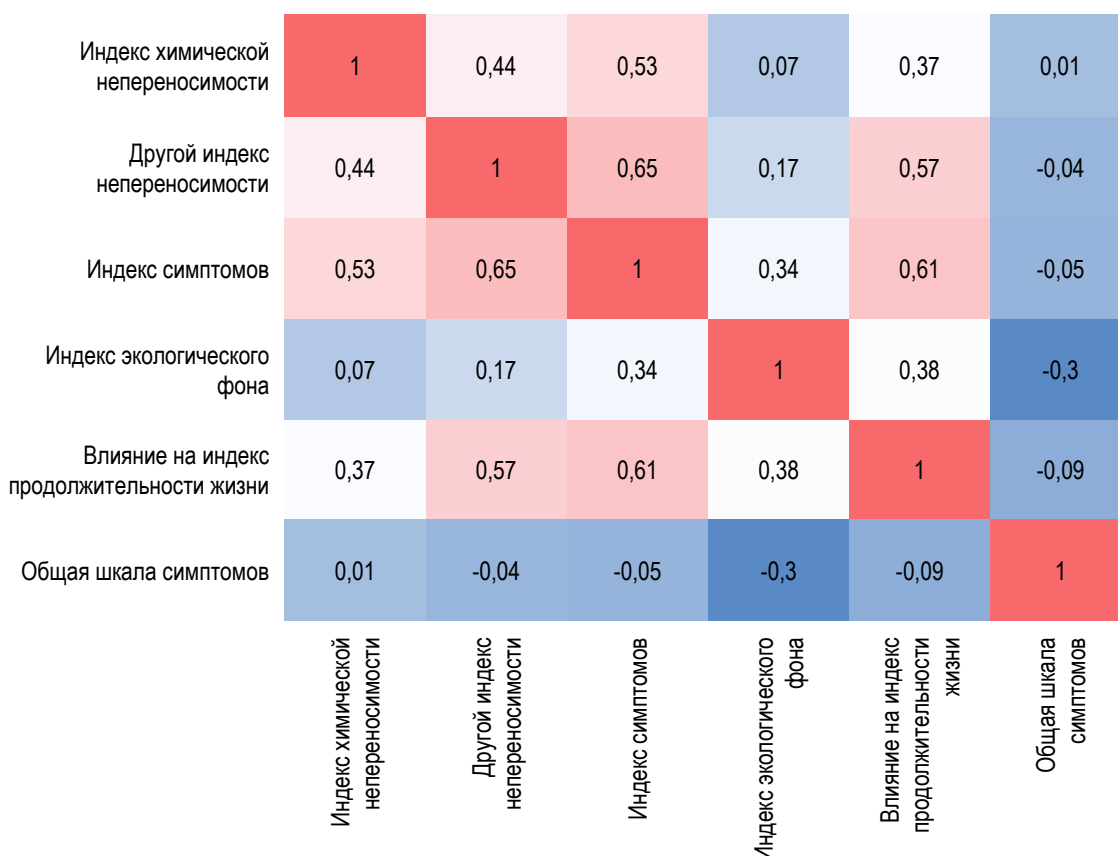


Рис. 4. Тепловая карта корреляции между индексами QEEI и интегральным баллом MSQ, отражающая связь между уровнем множественной химической чувствительности и выраженностью симптомов токсической нагрузки.

Fig. 4. Correlation heatmap between QEEI indices and the total MSQ score, illustrating the association between multiple chemical sensitivity severity and toxic load symptom severity.

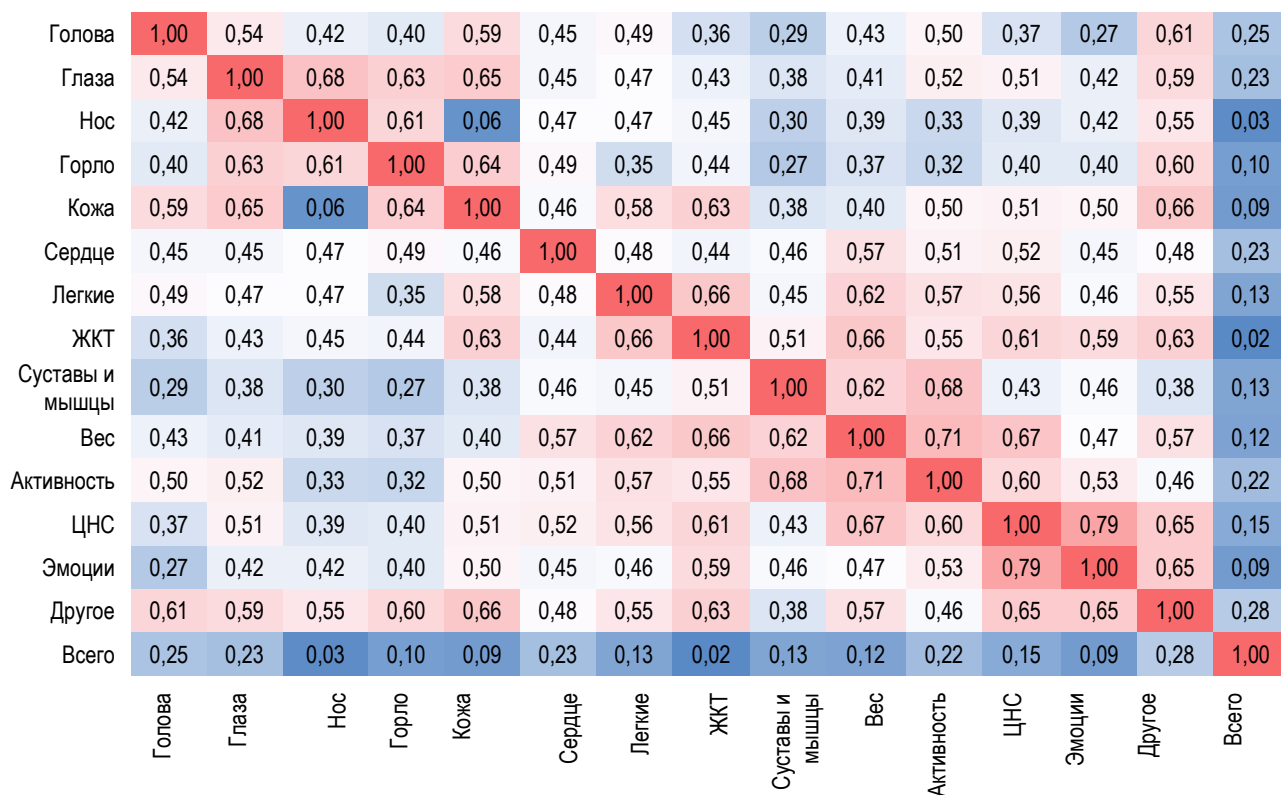


Рис. 5. Тепловая карта корреляционной матрицы между категориями MSQ и общим баллом QEEI.

Fig. 5. Correlation heatmap of the MSQ category matrix and the total QEEI score.

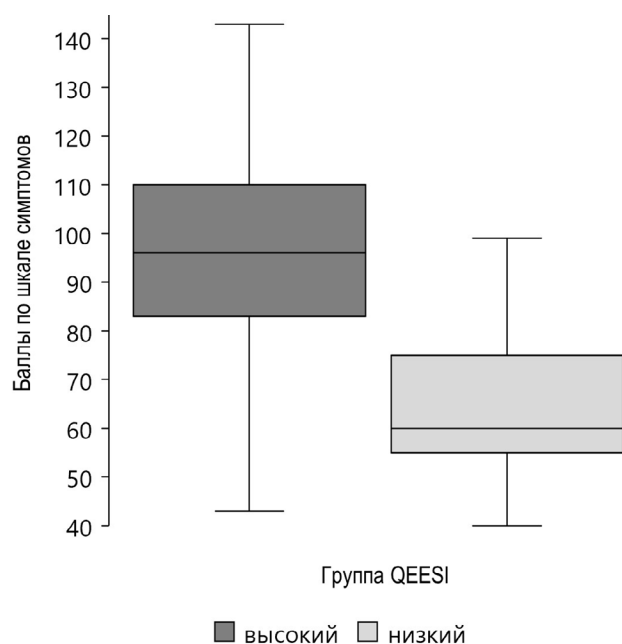


Рис. 6. Боксплот для выраженности симптомов по подгруппам QEESI (высокий и низкий уровень).

Fig. 6. Boxplot of symptom severity across QEESI subgroups (high vs low sensitivity).

нагрузки, однако с учётом ограниченного размера выборки необходимы дальнейшие исследования для более глубокого понимания этих взаимосвязей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование предоставило убедительные доказательства наличия значимой положительной корреляции между общим баллом QEESI и общим баллом MSQ ($r=0,649$, $p<0,001$), что подчёркивает тесную взаимосвязь между уровнем МХЧ и выраженностью симптомов токсической нагрузки. Этот результат свидетельствует о том, что лица с более высоким уровнем МХЧ, измеряемым опросником QEESI, склонны испытывать более интенсивные симптомы, отражённые в шкале MSQ, что частично подтверждает нашу гипотезу. Умеренная корреляция между общим баллом QEESI и категорией «другие симптомы» MSQ ($r=0,283$, $p=0,046$) указывает на значимость неспецифических проявлений в клинической картине МХЧ. Однако отсутствие значимых корреляций с другими категориями, такими как «ЦНС» ($r=0,145$, $p=0,314$) или «пищеварение» ($r=0,020$, $p=0,893$), не подтвердило вторую часть гипотезы о более выраженной связи с неврологическими или эмоциональными симптомами. Это может быть обусловлено ограниченным размером выборки или спецификой исследуемой популяции.

Сравнение групп с высоким и низким уровнем QEESI ($U=531$, $p<0,05$) дополнительно подтвердило, что более высокий уровень МХЧ связан с увеличением выраженности симптомов, что согласуется с корреляционным анализом. Наличие выбросов в данных QEESI (например,

значение 219) отражает гетерогенность выборки, указывая на возможное присутствие лиц с тяжёлыми формами МХЧ, что требует дальнейшего изучения. Применение метода «каппинга» для выбросов и импутация отсутствующих значений в дополнительном наборе данных обеспечили устойчивость результатов, несмотря на ограничения данных.

Анализ корреляций между разделами QEESI и общим баллом MSQ выявил умеренную отрицательную связь между Environmental Background Index и общим баллом MSQ ($r=-0,311$, $p<0,05$), что может указывать на адаптацию участников к экологическим факторам, снижающую выраженность симптомов. Сильная корреляция между Other Intolerance Index и Symptom Index ($r=0,65$, $p<0,001$) в рамках QEESI подчёркивает связь между непереносимостью различных факторов (например, пищи или лекарств) и выраженностью симптомов, что может быть важным для понимания механизмов МХЧ.

Полученные нами результаты подтверждаются данными международных исследований. Например, в исследовании A. Steinemann [10] сообщается, что 86,2% пациентов с МХЧ испытывали симптомы, вызванные ароматизированными продуктами, что согласуется с полученной нами корреляцией ($r=0,649$) между общими баллами QEESI и MSQ. Аналогичные результаты описаны в работе X. Cui и соавт. [11], где также отмечалась взаимосвязь между МХЧ и системными симптомами. Однако отсутствие значимых корреляций для большинства категорий MSQ, таких как «ЦНС» или «пищеварение», контрастирует с данными S. Nogué и соавт. [7], которые выявили взаимосвязь МХЧ и неврологических и гастроинтестинальных проявлений. Это расхождение может быть связано с региональными особенностями Краснодарского края, где экологические факторы, такие как промышленные выбросы, могли повлиять на профиль симптомов, или с малым размером выборки, который ограничил статистическую мощность для выявления слабых корреляций.

Значимая корреляция между общими баллами QEESI и MSQ ($r=0,649$, $p<0,001$) может быть объяснена рядом патофизиологических механизмов, лежащих в основе МХЧ. Одним из ключевых факторов является центральная сенсбилизация, при которой гиперчувствительность к химическим триггерам приводит к усилению восприятия симптомов через активацию ноцицептивных путей, включая рецепторы TRPV1 и TRPA1, что может вызывать нейровоспаление [12]. Иммунологические механизмы, такие как хроническое воспаление, также могут способствовать усилению симптомов токсической нагрузки, особенно в категориях, связанных с системными проявлениями [13]. Психологические факторы, включая тревожность и стресс, часто ассоциированные с МХЧ, могут дополнительно усиливать восприятие симптомов, особенно в эмоциональной и неврологической сферах [8], хотя в нашем исследовании связь с категорией «ЦНС» не достигла статистической значимости.

Сильная корреляция между Other Intolerance Index и Symptom Index ($r=0,65$, $p < 0,001$) может указывать на то, что непереносимость различных факторов (например, пищи, лекарств, пылицы) усиливает восприятие симптомов через общие механизмы сенсibilизации. Отрицательная корреляция между Environmental Background Index и общим баллом MSQ ($r=-0,311$, $p < 0,05$) требует дальнейшего изучения, так как она может быть связана с адаптацией к хроническому воздействию экологических факторов, снижающей выраженность симптомов.

Совместное использование опросников QEESI и MSQ демонстрирует их ценность как инструментов скрининга и мониторинга для пациентов с подозрением на МХЧ, особенно в регионах с высокой экологической нагрузкой, таких как Краснодарский край. Значимая корреляция между общими баллами ($r=0,649$, $p < 0,001$) подтверждает, что эти инструменты могут эффективно выявлять лиц с высоким уровнем МХЧ и выраженной токсической нагрузкой, что важно для ранней диагностики и планирования лечения. Анализ категорий MSQ, хотя и выявил значимую связь только с «другими симптомами», подчёркивает важность детализации клинической картины для дифференциальной диагностики и персонализации терапевтических подходов. Например, неспецифические симптомы, отражённые в категории «другие симптомы», могут указывать на необходимость более глубокого обследования, включая биохимические маркёры. Визуализация корреляций через тепловые карты (см. рис. 4, 5) предоставляет клиницистам наглядный инструмент для интерпретации данных, что может быть использовано в повседневной практике для принятия решений.

Ограничения исследования

Несмотря на значимость полученных результатов, исследование столкнулось с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации данных. Во-первых, небольшой размер выборки ($n=50$) мог ограничить статистическую мощность, особенно для выявления слабых корреляций между общим баллом QEESI и отдельными категориями MSQ. Во-вторых, поперечный дизайн исследования не позволяет установить причинно-следственные связи между уровнем МХЧ и выраженностью симптомов, что требует проведения лонгитюдных исследований. В-третьих, данные, основанные на самоотчётах, подвержены субъективным искажениям, связанным с восприятием симптомов участниками. Наконец, исследование не учитывало потенциальные конфаундеры, такие как демографические факторы, сопутствующие заболевания или другие переменные из набора данных, которые могли повлиять на результаты.

Перспективы

Результаты исследования открывают несколько направлений для дальнейших научных изысканий.

Во-первых, изучение связей между отдельными шкалами QEESI и категориями MSQ в более крупной выборке может предоставить более глубокое понимание механизмов МХЧ, что позволит выявить специфические аспекты чувствительности, наиболее тесно связанные с определёнными симптомами. Во-вторых, расширение выборки и проведение исследований в других регионах помогут подтвердить обобщаемость полученных результатов и учесть влияние экологических и демографических факторов. В-третьих, лонгитюдный дизайн позволит оценить динамику симптомов и их связь с МХЧ в течение времени, а также эффективность терапевтических вмешательств, таких как детоксикация или элиминация триггеров. В-четвертых, исследование других корреляций в наборе данных может выявить дополнительные факторы, влияющие на МХЧ, и симптомы, включая возраст, пол или уровень экологической нагрузки. Наконец, интеграция биомаркёров, таких как маркёры воспаления или оксидативного стресса, может дополнить субъективные данные опросников и повысить точность диагностики МХЧ.

Таким образом, проведённое нами исследование подтвердило значимость совместного использования QEESI и MSQ для оценки связи между МХЧ и токсической нагрузкой, однако для разработки эффективных диагностических и терапевтических стратегий необходимы дальнейшие исследования, учитывающие вышеуказанные перспективы и устраняющие выявленные ограничения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование выявило значимую положительную корреляцию между уровнем МХЧ (QEESI) и выраженностью симптомов токсической нагрузки (MSQ) у населения Южного федерального округа ($r=0,649$, $p < 0,001$). Категория «другие симптомы» MSQ показала умеренную связь с общим баллом QEESI ($r=0,283$, $p=0,046$), однако ожидаемой выраженной связи с неврологическими или эмоциональными категориями не выявлено, что может быть связано с ограничениями выборки. Анализ разделов QEESI выявил умеренную отрицательную корреляцию между Environmental Background Index и общим баллом MSQ ($r=-0,311$, $p < 0,05$), а также сильную взаимосвязь между Other Intolerance Index и Symptom Index ($r=0,65$, $p < 0,001$). Результаты подтверждают ценность QEESI и MSQ как инструментов скрининга и подчёркивают необходимость дальнейших исследований для разработки диагностических и терапевтических стратегий в экологической медицине.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Е.В. Болотова — дизайн исследования, обработка материалов, написание текста; В.В. Оноприев — концепция и дизайн исследования, написание текста; Л.В. Батракова — анализ полученных

данных, написание текста; А.Г. Абраменко — сбор и обработка материалов, написание текста; И.Г. Павельев — обработка и интерпретация статистического материала, формирование выводов, создание графиков и диаграмм. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено на заседании независимого этического комитета ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России (протокол № 126 от 05.10.2023).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП-20.1/67.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: E.V. Bolotova: methodology, investigation, writing—original draft; V.V. Onopriev: conceptualization, methodology, writing—original draft; L.V. Batrakova: formal analysis, writing—original draft; A.G. Abramenko: investigation, writing—original draft; I.G. Paveliev: processing and interpretation of statistical material, drawing conclusions, creating graphs and diagrams. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the Independent Ethics Committee of Kuban State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Minutes No. 126 dated October 5, 2023).

Consent for publication: Written informed consent was obtained from all participants prior to inclusion in the study.

Funding sources: This study was supported by the Kuban Science Foundation as part of the scientific-innovation project No. NIP-20.1/67.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article. Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Rossi S, Pitidis A. Multiple chemical sensitivity: review of the state of the art in epidemiology, diagnosis, and future perspectives. *J Occup Environ Med.* 2018;60(2):138–146. doi: 10.1097/JOM.0000000000001215
- Nordin S, Andersson L. Evaluation of a Swedish version of the Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory. *Int Arch Occup Environ Health.* 2010;83(1):95–104. doi: 10.1007/s00420-009-0427-4
- Miller CS, Prihoda TJ. A controlled comparison of symptoms and chemical intolerances reported by Gulf War veterans, implant recipients and persons with multiple chemical sensitivity. *Toxicol Ind Health.* 1999;15(3-4):386–397. doi: 10.1177/074823379901500312
- Skovbjerg S, Berg ND, Elberling J, Christensen KB. Evaluation of the quick environmental exposure and sensitivity inventory in a Danish population. *J Environ Public Health.* 2012;2012:304314. doi: 10.1155/2012/304314
- Bolotova E, Dudnikova A, Onopriev V, et al. Validation of the russian-language version of the QEESI questionnaire for the assessment of multiple chemical sensitivity syndrome. *Vrach.* 2024;35(7):57–64. doi: 10.29296/25877305-2024-07-10 EDN: QXNLSJ
- Onopriev VV, Bolotova EV, Dudnikova AV. Possibilities of the Ecomedic digital platform in diagnostics functional disorders. *Medical Council.* 2024;18(20):210–217. doi: 10.21518/ms2024-392 EDN: WPQFRE
- Nogué S, Fernández-Solá J, Rovira E, et al. Sensibilidad química múltiple: análisis de 52 casos [Multiple chemical sensitivity: study of 52 cases]. *Med Clin.* 2007;129(3):96–98; quiz 99. doi: 10.1157/13107370
- Zucco GM, Doty RL. Multiple chemical sensitivity. *Brain Sci.* 2021;12(1):46. doi: 10.3390/brainsci12010046
- Hojo S, Mizukoshi A, Azuma K, et al. New criteria for multiple chemical sensitivity based on the Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory developed in response to rapid changes in ongoing chemical exposures among Japanese. *PLoS One.* 2019;14(4):e0215144. doi: 10.1371/journal.pone.0215144
- Steinmann A. Prevalence and effects of multiple chemical sensitivities in Australia. *Prev Med Rep.* 2018;10:191–194. doi: 10.1016/j.pmedr.2018.03.007
- Cui X, Lu X, Hisada A, et al. The correlation between mental health and multiple chemical sensitivity: a survey study in Japanese workers. *Environ Health Prev Med.* 2015;20(2):123–129. doi: 10.1007/s12199-014-0434-2
- Rossi S, Pitidis A. Multiple chemical sensitivity: review of the state of the art in epidemiology, diagnosis, and future perspectives. *J Occup Environ Med.* 2018;60(2):138–146. doi: 10.1097/JOM.0000000000001215
- Lavric CE, Miguere N, de Blay F. Multiple chemical sensitivity: a review of its pathophysiology. *Explor Asthma Allergy.* 2024;2:350–362. doi: 10.37349/aaa.2024.00050

ОБ АВТОРАХ

* Батракова Любовь Викторовна;

адрес: Россия, 350063, Краснодар, ул. Митрофана Седина, д. 4;
ORCID: 0000-0002-3688-6064;
eLibrary SPIN: 4412-3236;
e-mail: batrakovalv@ksma.ru

AUTHORS' INFO

* Lubov V. Batrakova;

address: 4 Mitrofana Sedina st, Krasnodar, Russia, 350063;
ORCID: 0000-0002-3688-6064;
eLibrary SPIN: 4412-3236;
e-mail: batrakovalv@ksma.ru

Болотова Елена Валентиновна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-6257-354X;
eLibrary SPIN: 4322-9985;
e-mail: bolotowa_e@mail.ru

Оноприев Владимир Владимирович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-6676-5247;
eLibrary SPIN: 5631-6667;
e-mail: onoprievvv@ksma.ru

Абраменко Арина Геннадьевна;
ORCID: 0009-0007-6649-8576;
eLibrary SPIN: 5540-2472;
e-mail: 326142@gmail.com

Павельев Игорь Геннадьевич, кандидат пед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-5686-3858;
eLibrary SPIN: 2823-7763;
e-mail: ipavelyev@gmail.com

Elena V. Bolotova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-6257-354X;
eLibrary SPIN: 4322-9985;
e-mail: bolotowa_e@mail.ru

Vladimir V. Onopriev, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0002-6676-5247;
eLibrary SPIN: 5631-6667;
e-mail: onoprievvv@ksma.ru

Arina G. Abramenko;
ORCID: 0009-0007-6649-8576;
eLibrary SPIN: 5540-2472;
e-mail: 326142@gmail.com

Igor G. Paveliev, Cand. Sci. (Pedagogy), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-5686-3858;
eLibrary SPIN: 2823-7763;
e-mail: ipavelyev@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Влияние оптической стимуляции с частотами альфа-диапазона электроэнцефалограммы на параметры сенсомоторной деятельности человека

Н.А. Каратыгин¹, И.И. Коробейникова¹, М.А. Цыганова², Я.А. Венерина³, Т.Д. Джебраилова²

¹ Федеральный исследовательский центр оригинальных и перспективных биомедицинских и фармацевтических технологий, Москва, Россия;

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва, Россия;

³ Институт психологии Российской академии наук, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование Временные характеристики сенсомоторной деятельности определяются индивидуально-типологическими особенностями человека и могут изменяться под влиянием различных видов экзогенной стимуляции, в том числе оптической. Установлено, что разнонаправленное влияние оптической стимуляции на результативность деятельности связано с характеристиками исходной электроэнцефалограммы (ЭЭГ) индивида. Оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика оказывает наибольшее влияние на эндогенную ритмику, а с частотой выше или ниже на несколько герц способна в некоторых случаях оказывать эффект навязывания ритма и, сдвигая частоту осцилляций нейронных сетей, влиять на результативность деятельности.

Цель. Выявить индивидуальные различия влияния оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика и с частотой, превышающей её на 2 Гц, на параметры сложной сенсомоторной реакции человека.

Методы. В ходе исследования 65 испытуемых (мужчины 18–23 лет, правши) выполняли тесты на простую (в обычных условиях) и сложную двигательные реакции в трёх экспериментальных ситуациях: обычные условия, при предъявлении стимула в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика, в условиях оптической стимуляции с частотой выше частоты индивидуального α -пика на 2 Гц. Определяли среднее время реакции и её вариабельность. В обычных условиях вычисляли время принятия решения по разнице времени простой и сложной реакций. Выделены две группы испытуемых с малым (1-я группа, 16 человек) и большим (2-я группа, 16 человек) временем принятия решения. По исходной ЭЭГ, зарегистрированной в затылочно-теменных отведениях при закрытых глазах, рассчитывали частоту и амплитуду индивидуального α -пика.

Результаты. Оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц в целом по всем испытуемым снижала время сложной двигательной реакции. У испытуемых с малым временем принятия решения и высокой амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой α -пика время сложной реакции увеличивалось, при оптической стимуляции с частотой α -пика +2 Гц значимых изменений времени реакции не обнаружено. У испытуемых с большим временем принятия решения и низкой амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой α -пика значимых изменений времени сложной реакции не наблюдалось, при оптической стимуляции с частотой α -пика +2 Гц уменьшались время и вариабельность сложной реакции.

Заключение. Установлено, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц снижает время сложной двигательной реакции у лиц с определёнными электрофизиологическими характеристиками ЭЭГ. Именно поэтому при применении оптической стимуляции с частотами α -диапазона необходимо учитывать исходные характеристики ЭЭГ, прежде всего амплитуду индивидуального α -пика, так как она связана с выраженностью и направленностью эффекта влияния стимуляции. Результаты исследования позволяют говорить о принципиально различном влиянии на временные параметры сенсомоторной деятельности двух исследуемых видов оптической стимуляции с частотами α -диапазона.

Ключевые слова: оптическая стимуляция; индивидуальный альфа-пик; фоновая ЭЭГ; время сенсомоторной реакции.

Как цитировать:

Каратыгин Н.А., Коробейникова И.И., Цыганова М.А., Венерина Я.А., Джебраилова Т.Д. Влияние оптической стимуляции с частотами альфа-диапазона электроэнцефалограммы на параметры сенсомоторной деятельности человека // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 735–744.

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco690411> EDN: TMZRJS

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco690411>

EDN: TMZRJS

Effect of Alpha-Frequency Optical Stimulation on Sensorimotor Parameters in Humans

Nikolay A. Karatygin¹, Irina I. Korobeinikova¹, Margarita A. Tsyganova²,
Yana A. Venerina³, Tamara D. Dzhebrailova²

¹ Federal Research Center for Innovator and Emerging Biomedical and Pharmaceutical Technologies, Moscow, Russia;

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russia;

³ Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Temporal sensorimotor parameters are determined by individual characteristics and may be influenced by various types of exogenous stimulation, including optical stimulation. The multidirectional effects of optical stimulation on performance are associated with baseline electroencephalogram (EEG) parameters. Optical stimulation with individual alpha peak frequency has the most significant effect on endogenous rhythmicity. Frequencies that are several hertz higher or lower can result in flicker response and affect performance by altering neural oscillation frequencies.

AIM: The work aimed to assess individual differences in the effect of optical stimulation with individual alpha peak frequency and a 2 Hz higher frequency on complex sensorimotor response parameters in humans.

METHODS: In this study, 65 participants (males aged 18–23 years, right-handed) performed tests for simple motor reaction (under normal conditions) and complex motor reaction (under three experimental scenarios). The latter included normal conditions, optical stimulation with individual alpha peak frequency, and optical stimulation with a frequency 2 Hz higher than individual alpha peak frequency. The mean reaction time and its variability were assessed. Under normal conditions, the decision-making time was assessed by the difference between the simple and complex reaction times. Two groups of participants, with short (group 1, $n = 16$) and long (group 2, $n = 16$) decision-making times, were identified. The frequency and amplitude of an individual alpha peak were calculated using baseline occipitoparietal EEGs recorded with eyes closed.

RESULTS: Optical stimulation with individual alpha peak frequency +2 Hz reduced the complex motor reaction time in all participants. In participants with short decision-making time and high alpha peak amplitude, optical stimulation with individual alpha peak frequency increased the complex motor reaction time, whereas optical stimulation with individual alpha peak frequency +2 Hz had no significant impact on the reaction time. In participants with long decision-making time and low alpha peak amplitude, optical stimulation with individual alpha peak frequency had no significant impact on the complex reaction time, whereas optical stimulation with individual alpha peak frequency +2 Hz decreased complex reaction time and variability.

CONCLUSION: Optical stimulation with individual alpha peak frequency +2 Hz reduced the complex motor reaction time in individuals with specific electrophysiological EEG characteristics. Therefore, it is essential to consider baseline EEG parameters during alpha-frequency optical stimulation, particularly the individual alpha peak amplitude, which is associated with the strength and direction of the stimulation effect. The findings indicate that the two examined modes of alpha-frequency optical stimulation have distinct effects on temporal sensorimotor parameters.

Keywords: optical stimulation; individual alpha peak; background EEG; sensorimotor reaction time.

To cite this article:

Karatygin NA, Korobeinikova II, Tsyganova MA, Venerina YaA, Dzhebrailova TD. Effect of Alpha-Frequency Optical Stimulation on Sensorimotor Parameters in Humans. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):735–744. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco690411> EDN: TMZRJS

Received: 15.09.2025

Accepted: 22.10.2025

Published online: 27.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco690411>

EDN: TMZRJS

EEG α 波频段光刺激对人类感觉-运动活动参数的影响

Nikolay A. Karatygin¹, Irina I. Korobeinikova¹, Margarita A. Tsyganova²,
Yana A. Venerina³, Tamara D. Dzhebrailova²

¹ Federal Research Center for Innovator and Emerging Biomedical and Pharmaceutical Technologies, Moscow, Russia;

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russia;

³ Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

摘要

论证。感觉 - 运动活动的时间特征由个体类型学特性决定，并可在多种外源性刺激，包括光刺激，作用下发生改变。已有研究表明，光刺激对活动结果的方向性影响与个体初始EEG特征相关。与个体 α 峰一致频率的光刺激对内源性节律影响最大，而高于或低于该频率数赫兹的刺激在某些情况下可产生节律强迫效应，并通过改变神经网络振荡频率影响活动表现。

目的。探讨个体 α 峰频率光刺激与高出该频率2 Hz光刺激对复杂感觉 - 运动反应参数影响的个体差异。

方法。65名男性受试者（18 - 23岁，右利手）完成简单（正常条件下）与复杂运动反应任务。实验包含三种条件：正常条件、个体 α 峰频率光刺激、个体 α 峰+2 Hz光刺激。测量平均反应时间及其变异性。在普通条件下，通过简单与复杂反应时间差计算决策时间。将受试者分为决策时间短（1组，16人）与决策时间长（2组，16人）两组。随后在闭眼状态下记录枕 - 顶导联EEG，计算个体 α 峰频率与振幅。

结果。在全部受试者总体上， α 峰+2 Hz光刺激可降低复杂运动反应时间。决策时间短且 α 峰振幅高者在 α 峰光刺激下复杂反应时间增加，而在 α 峰+2 Hz条件下未见显著变化。决策时间长且 α 峰振幅低者在 α 峰光刺激下复杂反应时间未见显著变化，而在 α 峰+2 Hz光刺激条件下复杂反应时间及其变异性均下降。

结论。研究表明， α 峰+2 Hz光刺激在具有特定EEG电生理特征的个体中可降低复杂运动反应时间。因此，在使用 α 波频段光刺激时必须考虑个体基线EEG特征，尤其是 α 峰振幅，因为其与光刺激效应方向与强度相关。研究结果表明，这两种 α 波频段光刺激对感觉 - 运动活动时间参数具有显著不同的影响。

关键词：光刺激；个体 α 峰；背景EEG；感觉 - 运动反应时间。

引用本文：

Karatygin NA, Korobeinikova II, Tsyganova MA, Venerina YaA, Dzhebrailova TD. EEG α 波频段光刺激对人类感觉 - 运动活动参数的影响. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):735–744. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco690411> EDN: TMZRJS

收到: 15.09.2025

接受: 22.10.2025

发布日期: 27.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

В современном мире человек постоянно подвергается воздействию множества экзогенных факторов, многие из которых обладают ритмическим характером, например, акустические или электромагнитные шумы различных частот. Эти факторы могут оказывать значительное влияние на функциональное состояние организма человека и эффективность различных видов деятельности [1, 2]. Направленность эффекта зависит как от характеристик самого фактора, так и от индивидуальных нейрофизиологических особенностей человека. В условиях ритмической стимуляции люди с разной организацией высшей нервной деятельности способны демонстрировать снижение или повышение результативности, например, сенсомоторной деятельности (СМД), что особенно актуально в производственной, транспортной и спортивной сферах.

Параметры сенсомоторных реакций (СМР) являются важными индивидуально-типологическими характеристиками человека, отражающими способность быстро и точно обрабатывать информацию и реагировать на внешние стимулы. Простые СМР включают реакцию на одиночный стимул, что позволяет оценить быстроту и стабильность сенсомоторного реагирования. Сложные СМР, такие как реакции выбора или дифференцировочные реакции (реакции Go/No-go), предполагают более высокий уровень когнитивной обработки, поскольку требуют выбора реакции в зависимости от типа стимула или её торможения на нерелевантный стимул.

Стандартными показателями СМР являются время реакции (временной интервал от подачи стимула до моторного ответа), показатель вариабельности сенсомоторного реагирования (индивидуальная изменчивость времени реакции, чаще всего определяемая по величине стандартного отклонения) и количество опережающих реакций и ошибок.

Время реакции может быть связано с различными личностными характеристиками индивида, такими как общий уровень активации нервной системы [3], уровень внимания, личностная и ситуативная тревожность [4, 5].

Показатель вариабельности СМР, наряду с временем реакции, является одной из главных характеристик СМД. Показано, что высокая вариабельность связана с более низкой результативностью выполнения сложных когнитивных задач [6]. Полагают, что она косвенно характеризует устойчивость внимания испытуемого [7]. Высокая вариабельность простой двигательной реакции может являться коррелятом ряда психических и соматических расстройств, например, наблюдается при аутизме, синдроме дефицита внимания и гиперактивности [8].

При анализе СМР обычно выделяют премоторный и моторный компоненты. Премоторный компонент отражает преимущественно процессы, связанные с восприятием и анализом стимула, а моторный связывают с реализацией двигательного ответа.

Для дифференцировочных реакций премоторный компонент включает не только детекцию стимула, как в простых СМР, но и дополнительный анализ этого стимула для принятия решения о необходимости действия или игнорирования стимула. Время принятия решения (ВПР) можно рассчитать как разницу между временем простой и дифференцировочной СМР. Результаты собственных исследований и данные литературы свидетельствуют о том, что ВПР имеет существенные индивидуальные различия, которые коррелируют с некоторыми особенностями исходной ЭЭГ человека [9].

Временные характеристики СМР определяются не только индивидуально-типологическими особенностями, но и могут изменяться под влиянием различных видов экзогенной стимуляции. Показано, что в этом случае применимы не только методы электрической и магнитной транскраниальной стимуляции [10], непосредственно влияющие на частотные характеристики нейронной активности, но и более простые и доступные методы звуковой [11] или оптической [12] стимуляции, которые при правильно подобранном частотном воздействии также могут изменять эндогенную активность нейронных ансамблей, что в свою очередь влияет на показатели СМР. В ряде исследований показано, что оптическая стимуляция на частотах α -диапазона (8–12 Гц) может оказывать разнонаправленные влияния на результативность как сенсомоторной, так и когнитивной деятельности. Это зависит от специфики самой деятельности и от психофизиологических характеристик индивида. С одной стороны, установлено, что такая оптическая стимуляция приводит к повышению пропускной способности и надёжности человека-оператора (уменьшению количества ошибок) [13]. С другой стороны, показано, что для некоторых видов деятельности, связанных, например, с временем распознавания зрительных стимулов, оптическая стимуляция и последующие эффекты навязывания ритма в структурах зрительной системы могут иметь негативное влияние на успешность выполнения задания [14].

По данным литературы, премоторный компонент сложной реакции, главной составляющей которого является ВПР, более подвержен влиянию различных эндогенных и экзогенных факторов, таких как эмоциональное состояние индивида [15], степень утомления [16], сложность сенсомоторного задания [17], различные фармакологические воздействия [18], поэтому можно полагать, что именно ВПР будет наиболее чувствительно и к воздействию оптической стимуляции. Можно также предположить, что характер (направленность) влияния оптической стимуляции на параметры СМД связан с индивидуальными различиями ВПР. Именно поэтому для выявления индивидуальных особенностей, обуславливающих различный эффект оптической стимуляции на параметры СМД, мы выделили группы испытуемых с малым и большим ВПР в обычных условиях без оптической стимуляции.

Ранее в наших исследованиях установлено, что разнонаправленное влияние оптической стимуляции на результативность мнестической деятельности связано с индивидуальными характеристиками фоновой ЭЭГ человека. Было показано, что у лиц с изначально более низкой спектральной мощностью поддиапазона 10 Гц увеличение эффективности мнестической деятельности (тест n-back) в условиях оптической стимуляции сопровождалось увеличением спектральной мощности этого поддиапазона [19].

Наряду с традиционно используемыми спектральными показателями исходной ЭЭГ, в настоящее время предметом анализа α -активности часто являются характеристики индивидуального α -пика: его частота (IAF — Individual Alpha Frequency) и амплитуда. В ряде исследований показано, что IAF может отражать различия индивидов по эффективности рабочей памяти, скорости переработки информации, времени реакции и может изменяться при выполнении когнитивных задач или физических упражнений [20, 21].

Связь частоты α -ритма и эффектов оптической стимуляции может быть рассмотрена в двух аспектах. С одной стороны, нами показано, что под влиянием оптической стимуляции с частотой 10 Гц изменяется вариабельность простой СМР человека, причём направленность таких изменений зависит от базовых характеристик фоновой ЭЭГ — глубины десинхронизации высокочастотного диапазона α -ритма и IAF исходной ЭЭГ [22]. С другой стороны, в исследованиях установлено, что оптическая стимуляция с индивидуальной частотой α -пика оказывает наибольшее влияние на эндогенную ритмику, а с частотой выше или ниже на несколько герц способна в некоторых случаях оказывать эффект навязывания ритма и, сдвигая частоту работы нейронных ансамблей, влиять на результативность деятельности [23]. С учётом того, что выраженность навязывания ритма зависит от силы стимуляции и разницы между IAF и частотой стимуляции [24], во многих исследованиях авторы выбирают частоту стимуляции $IAF \pm 1$ Гц или $IAF \pm 2$ Гц. При этом $IAF \pm 2$ Гц рассматривается в качестве наиболее подходящего компромиссного значения, дающего достаточный эффект оптической стимуляции без необходимости использования чрезмерно яркого источника света.

Цель исследования. Выявить индивидуальные различия влияния оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика и с частотой, превышающей её на 2 Гц, на параметры сложной СМР человека.

МЕТОДЫ

В исследовании на основе добровольного информированного согласия участвовали 65 мужчин 18–23 лет, правши, с нормальной остротой зрения или скорректированной до нормальной. Исследование одобрено этическим комитетом Первого Московского государственного

медицинского университета им. И.М. Сеченова (протокол № 10-24 от 18.04.2024) и проведено в апреле–июне 2024 г.

Испытуемый находился в затемнённой комнате в отсутствии посторонних раздражителей, сидя на расстоянии 70 см от экрана монитора. В качестве СМД предлагали два компьютеризированных теста на время простой двигательной реакции (ВПДР; 70 предъявлений стимулов) и на время сложной двигательной реакции (ВСДР, Go/No-go; 70 предъявлений целевого стимула и 70 предъявлений нерелевантного стимула). В первом случае задача испытуемого заключалась в том, чтобы как можно скорее нажать на определённую кнопку клавиатуры правой рукой при появлении красного круга в центре экрана монитора, стараясь не допускать преждевременных нажатий. Интервал между сигналами составлял от 0,8 до 2,5 с. При выполнении теста на ВСДР испытуемый должен был реагировать нажатием кнопки только на стимул красного цвета, игнорируя стимул зелёного цвета.

В обследовании использовали монитор HP 2011х с диагональю 20 дюймов. Для оптической стимуляции применяли фотостимулятор 7,5×7,5 см, который располагался непосредственно над монитором. При мерцании стимулятора яркость вспышек, измеренная в непосредственной близости от него, составляла 200 lx.

Сенсомоторный тест на ВПДР оценивали в обычных условиях (ситуация ТЕСТ). ВСДР предъявляли в трёх экспериментальных ситуациях: в обычных условиях (ТЕСТ); при предъявлении стимула в условиях оптической стимуляции с частотой IAF испытуемого (ТЕСТ_{IAF}); в условиях оптической стимуляции с частотой выше IAF на 2 Гц (ТЕСТ_{IAF+2}). Общее время оптической стимуляции было индивидуально, зависело от скорости реакции испытуемого и примерно составляло 5,12 мин с частотой IAF и 5,12 мин с частотой IAF+2.

При обработке результатов тестов определяли среднее ВПДР и ВСДР в мс, а также вариабельность ВСДР ($SD_{всдр}$) как стандартное отклонение в трёх экспериментальных ситуациях. Для каждого испытуемого высчитывали ВПР (мс) по разнице значений ВСДР и ВПДР в обычных условиях (ситуация ТЕСТ).

Регистрацию ЭЭГ (17 отведений, монополярно по схеме 10–10: F3, Fz, F4, T3, C3, Cz, C4, T4, P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, P5, Poz, P6) проводили на электроэнцефалографе NVX-52 (Россия, ООО «Медицинские компьютерные системы», Зеленоград). По данным ЭЭГ, зарегистрированной в исходном состоянии при закрытых глазах в девяти затылочно-теменных отведениях (P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, P5, Poz, P6), рассчитывали IAF и амплитуду α -пика путём вычисления значения спектральной плотности мощности ЭЭГ α -диапазона (8–13 Гц) с использованием метода multi-taper, реализованного посредством функции `psd_multitaper` модуля MNE-python [25].

Проверку данных на нормальность распределения проводили по тесту Колмогорова–Смирнова.

Для представления и анализа результатов использовали методы непараметрической статистики («STATISTICA v.8»). Данные представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха [Q1; Q3]. При сравнении результатов обследования испытуемых независимых групп использовали *U*-критерий Манна–Уитни. Изменения показателей в разных ситуациях у испытуемых одной группы оценивали с применением *T*-критерия Вилкоксона. Достоверными считали отличия при $p < 0,05$. Значения p скорректированы с учётом поправки по Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведённый анализ по группе испытуемых в целом выявил ряд различий в значениях ВСДР в трёх экспериментальных ситуациях. Установлено уменьшение ВСДР в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуациями ТЕСТ и ТЕСТiaf. Различия по показателю variability ВСДР в группе испытуемых в целом в трёх экспериментальных ситуациях не зарегистрированы (табл. 1).

Обращали на себя внимание существенные индивидуальные различия изменения ВСДР в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с другими ситуациями. По сравнению с ситуацией ТЕСТ уменьшение ВСДР составило 5,95 [–2,90;

13,95] мс при индивидуальных вариациях от уменьшения на 30,05 мс до увеличения на 35,85 мс.

ВПР, составившее в целом по группе 78,05 [65,90; 89,65] мс, индивидуально варьировало от минимальных 43,3 мс до максимальных 168,8 мс. В соответствии с Q1 и Q3 были выделены две группы испытуемых: с малым (1-я группа, 16 человек,) и большим (2-я группа, 16 человек) ВПР. У испытуемых 1-й группы ВПР составило 55,3 [49,13; 61,10] мс, 2-й группы — 105,0 [95,83; 126,60] мс.

Параметры простой и сложной СМД в трёх ситуациях обследования у испытуемых двух групп представлены в табл. 2.

ВПДР у испытуемых выделенных групп значимо не различалось. ВСДР во всех ситуациях было значимо большим у испытуемых 2-й группы. Направленность изменений ВСДР в условиях оптической стимуляции у испытуемых выделенных групп была различной.

У испытуемых 1-й группы ВСДР в условиях ТЕСТiaf было большим, чем в обычных условиях. В ситуации ТЕСТiaf+2 ВСДР не отличалось от наблюдавшегося в обычных условиях.

У испытуемых 2-й группы в условиях ТЕСТiaf относительно ситуации ТЕСТ значимых изменений ВСДР

Таблица 1. Значения времени сложной двигательной реакции и его variability в ситуациях ТЕСТ, ТЕСТiaf, ТЕСТiaf+2, Me [Q1; Q3]

Table 1. Complex motor reaction time and its variability during TEST, TESTiaf, and TESTiaf+2, Me [Q1; Q3]

Показатели	ТЕСТ	ТЕСТiaf	ТЕСТiaf+2
Время сложной двигательной реакции, мс	362,85* [344,70; 387,15]	363,10# [345,60; 382,80]	359,90** [339,30; 382,05]
SDвсдр, мс	53,04 [46,06; 61,50]	52,34 [42,79; 59,62]	49,58 [42,54; 66,63]

Примечание. ТЕСТ — обычные условия; ТЕСТiaf — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика испытуемого; ТЕСТiaf+2 — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика испытуемого на 2 Гц; SDвсдр — variability времени сложной двигательной реакции; * достоверные отличия значений времени сложной двигательной реакции в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=666$; $Z=2,66$; $p=0,0079$); # достоверные отличия значений времени сложной двигательной реакции в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТiaf ($T=565$; $Z=3,18$; $p=0,0015$).

Таблица 2. Показатели времени простой и сложной двигательных реакций в ситуациях ТЕСТ, ТЕСТiaf, ТЕСТiaf+2 испытуемых 1-й и 2-й групп, Me [Q1; Q3]

Table 2. Simple and complex motor reaction times during TEST, TESTiaf, and TESTiaf+2 in groups 1 and 2, Me [Q1; Q3]

Показатели	1-я группа	2-я группа	Тест Манна–Уитни U ; Z ; p
ВПДР ТЕСТ, мс	279,325 [269,28; 300,23]	291,775 [281,00; 298,38]	—
ВСДР ТЕСТ, мс	331,675* [323,60; 354,30]	397,95# [390,08; 410,90]	6; –4,598; <0,001
ВСДР ТЕСТiaf, мс	337,00* [330,20; 365,33]	389,05 [380,90; 409,08]	17; –4,184; <0,001
ВСДР ТЕСТiaf+2, мс	330,475 [321,58; 359,10]	384,03# [372,13; 400,43]	23; –3,957; <0,001
SDвсдр ТЕСТ, мс	49,627 [41,81; 53,78]	63,75 [55,11; 73,51]	35; –3,505; <0,001
SDвсдр ТЕСТiaf, мс	48,731 [39,36; 58,90]	57,30 [50,49; 68,71]	—
SDвсдр ТЕСТiaf+2, мс	44,792 [35,94; 53,97]	53,86 [47,09; 69,06]	—

Примечание. ВПДР — время простой двигательной реакции; ВСДР — время сложной двигательной реакции; ТЕСТ — обычные условия; ТЕСТiaf — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика испытуемого; ТЕСТiaf+2 — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика испытуемого на 2 Гц; SDвсдр — variability времени сложной двигательной реакции; *статистически значимые отличия значений ВСДР у испытуемых 1-й группы в ситуации ТЕСТiaf по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=10,0$; $Z=3,0$; $p=0,0027$); #статистически значимые отличия значений ВСДР у испытуемых 2-й группы в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=1,0$; $Z=3,46$; $p=0,0005$).

не обнаружено. В условиях ТЕСТiaf+2 ВСДР было меньше, чем в ситуации ТЕСТ.

SDвсдр в ситуации ТЕСТ у испытуемых 1-й группы по сравнению с испытуемыми 2-й группы была достоверно ниже (см. табл. 2). Значимых изменений этого показателя у испытуемых 1-й группы при выполнении ВСДР в условиях ТЕСТiaf и ТЕСТiaf+2 не зарегистрировано. У испытуемых 2-й группы в условиях ТЕСТiaf+2 имелось снижение вариабельности ВСДР по сравнению с ситуацией ТЕСТ на уровне тенденции.

Таким образом, у лиц с малым ВПР в условиях ТЕСТiaf ВСДР увеличивалось, при этом его вариабельность не изменялась. У лиц с исходно большим ВПР в ситуации ТЕСТiaf+2 ВСДР уменьшалось.

По частоте IAF испытуемые выделенных групп не различались: 10,13 [9,80; 10,63] Гц и 10,30 [9,74; 11,26] Гц соответственно группам. Амплитуда α -пика была достоверно выше у испытуемых 1-й группы: 65,64 [14,35; 171,45] мкВ и 14,22 [6,93; 46,87] мкВ соответственно группам, $U=73,0$; $Z=2,073$; $p=0,038$.

ОБСУЖДЕНИЕ

В литературе при анализе характеристик α -пика основное внимание уделяется его частоте, при этом существенно меньшее количество исследований посвящено анализу амплитуды α -пика. Однако амплитуда и частота α -пика по-разному коррелируют с поведенческими показателями [26].

Анализ фоновой ЭЭГ испытуемых установил, что амплитуда α -пика была значимо выше у лиц с исходно малым ВПР. По частоте α -пика испытуемые выделенных групп не различались. Несмотря на то что существуют работы, свидетельствующие о взаимосвязи IAF и некоторых скоростных характеристик обработки зрительной информации [27], также имеются свидетельства, что непосредственно скорость СМР не зависит от IAF [28].

В настоящем исследовании применяли два вида оптической стимуляции. По данным литературы, стимуляция с частотой индивидуального α -пика и с частотой, отличающейся от неё на несколько герц, оказывает разное влияние на характеристики α -активности, а также на результативность деятельности [29].

Также известно, что оптическая стимуляция с частотой IAF даёт наибольший прирост амплитуды α -ритма по сравнению с оптической стимуляцией, отличающейся от IAF, увеличивая синхронизацию активности ансамблей нейронов, осциллирующих на этой частоте, что может как позитивно, так и негативно влиять на результат СМД [23].

Проведённое исследование показало, что у испытуемых с исходно малым ВПР и высокой исходной амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой IAF наблюдалось увеличение ВСДР. В группе испытуемых с большим ВПР и низкой амплитудой α -пика в этих условиях не только не наблюдалось увеличения ВСДР,

но отмечалось некоторое уменьшение времени реакции, не достигавшее, однако, статистически значимого уровня. Эти факты можно объяснить с учётом известной концепции о том, что наибольшей эффективности деятельности соответствует некоторый средний или оптимальный уровень активации (кривая Йеркса–Додсона) [30]. Мощность α -ритма является одним из параметров, отражающих уровень активации коры головного мозга, который обусловлен влиянием комплекса факторов, таких как специфические и неспецифические активирующие влияния, мотивация, эмоциональное состояние, тревожность и другие. Можно полагать, что у испытуемых с малым ВПР и относительно высокой исходной амплитудой α -пика такой оптимальный для СМД уровень активации наблюдался именно при тестировании в обычных условиях. А усиление синхронизации α -ритма при оптической стимуляции соответствующей частоты приводило к «выходу» из оптимальной зоны и увеличению времени сложной реакции. В то же время у части испытуемых с исходно низкой амплитудой α -пика и большим временем реакции оптическая стимуляция с частотой IAF, способствующая синхронизации α -ритма, сопровождалась уменьшением ВСДР, что и проявлялось в уменьшении медианы, не достигавшем, однако статистически значимого уровня. Можно полагать, что одним из факторов, определяющих характер влияния оптической стимуляции с частотой IAF на параметры СМД конкретного индивида, является соотношение наблюдаемого во время тестирования и оптимального для деятельности уровня активации коры головного мозга.

Оптическая стимуляция с частотой, отличающейся от IAF на несколько герц, работает по другому принципу, такая стимуляция может оказывать эффект навязывания ритма и сдвигать частоту осцилляции нейронных сетей. В литературе эффективность такого сдвига объясняется с помощью концепции «язык Арнольда», которая описывает динамические принципы взаимодействия экзогенных ритмов и мозговых осцилляций. Чем ближе частота стимуляции к собственной частоте мозгового ритма и чем выше интенсивность стимуляции, тем сильнее эффект навязывания ритма. Таким образом, для α -ритма эффективность сдвига эндогенных осцилляций прежде всего будет зависеть от силы стимуляции и разницы между IAF и частотой стимуляции [24]. Было показано, что успешное навязывание ($IAF \pm 2$ Гц), осуществлённое с помощью метода транскраниальной электрической стимуляции, может оказывать влияние и на результативность выполнения перцептивной и СМД [31]. Оптическая стимуляция с частотой, превышающей IAF, также способна вызывать эффект навязывания ритма и оказывать положительное влияние на временные характеристики СМД [23].

Результат настоящего исследования в целом согласуется с данными литературы и подтверждает возможность увеличения скорости сложной СМР путём применения оптической стимуляции с частотой IAF +2 Гц. Однако в нашем

исследовании установлено, что уменьшение времени реакции в ситуации оптической стимуляции с частотой IAF +2Гц по сравнению с обычными условиями наблюдалось у испытуемых с исходно большим ВПР и низкой амплитудой α -пика. В той же ситуации у испытуемых с малым ВПР и относительно высокой амплитудой α -пика изменений времени сложной СМР не выявлено.

В литературе приводятся данные о том, что чем шире α -кривая в состоянии покоя (и, вероятно, ниже амплитуда α -пика), тем выше эффекты модуляции, направленные на смещение собственной частоты в сторону быстрых ритмов [29]. Можно полагать, что оптическая стимуляция с частотой IAF +2Гц в большей мере увеличивает частоту α -ритма при навязывании у испытуемых с низкой амплитудой α -пика. С другой стороны, известны количественные закономерности обработки информации человеком, рассчитанные на основе интегральной модели деятельности мозга, одним из основных нейрофизиологических параметров которой является частота доминирующего α -ритма [32]. Согласно этим представлениям, у лиц с исходно низкой амплитудой α -пика (и исходно высоким ВПР) уменьшение времени сложной реакции, по-видимому, происходит за счёт более выраженного эффекта навязывания ритма, когда оптическая стимуляция с частотой IAF +2Гц увеличивает частоту активности нейронных ансамблей, что способствует уменьшению ВСДР и его вариабельности. В отличие от них, у испытуемых с высокой исходной амплитудой α -пика и низким ВПР подобная стимуляция не оказывала выраженного эффекта на время реакции относительно выполнения теста без оптической стимуляции.

Таким образом, настоящее исследование показало, что оптическая стимуляция с частотой, превышающей IAF на 2 Гц, способна уменьшать время сложной реакции у испытуемых с определёнными электрофизиологическими характеристиками исходной ЭЭГ, в то время как оптическая стимуляция с частотой IAF не оказывала выраженного положительного эффекта на скоростные характеристики СМД, а у части испытуемых могла приводить к снижению результата. В целом можно сделать вывод, что при применении оптической стимуляции с частотами α -диапазона необходимо учитывать индивидуальные характеристики исходной ЭЭГ человека. Исходя из полученных результатов, наиболее эффективно использование оптической стимуляции с частотой IAF +2Гц у лиц с исходно большим ВПР, которые характеризуются низкой амплитудой индивидуального α -пика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании применяли два вида оптической стимуляции — с частотой индивидуального α -пика ЭЭГ и с частотой выше индивидуального α -пика на 2 Гц. Установлено, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц снижает

время сложной двигательной реакции у части испытуемых с определёнными электрофизиологическими характеристиками ЭЭГ. У лиц с разным исходным ВПР изменения временных параметров сложной двигательной реакции в условиях оптической стимуляции с указанными частотами α -диапазона различны. При этом у лиц с исходно низким ВПР амплитуда α -пика была значимо выше, чем у испытуемых с большим ВПР. Показано, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика может оказывать негативный эффект на результативность СМД лиц с исходно низким ВПР. У испытуемых с исходно высоким ВПР в ситуации оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика на 2 Гц снижалось время сложной двигательной реакции по сравнению со временем реакции в условиях отсутствия стимуляции. По частоте α -пика испытуемые выделенных групп не различались. Таким образом, установлено, что ВПР связано с исходными характеристиками ЭЭГ, в первую очередь с амплитудой индивидуального α -пика, что может служить объяснением разнонаправленности эффектов влияния оптической стимуляции с частотами α -диапазона на временные параметры СМР человека. При этом результаты исследования позволяют говорить о принципиально различном влиянии на временные параметры СМД двух исследуемых видов оптической стимуляции α -диапазона. Проведённое исследование может иметь важное значение для оценки экологичности ритмической световой стимуляции α -диапазона в современной техногенной среде и понимания её потенциального влияния на сенсомоторные функции человека, что полезно при разработке безопасных и эффективных подходов к использованию такого воздействия в повседневной жизни и профессиональной деятельности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.А. Каратыгин, И.И. Коробейникова — сбор и анализ литературных источников, биоинформатический анализ данных, подготовка и написание текста статьи; М.А. Цыганова, Я.А. Венерина — проведение обследований, обработка данных; Т.Д. Джебраилова — написание текста и редактирование статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова (протокол № 10-24 от 18.04.2024).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках Государственного задания.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: N.A. Karatygin, I.I. Korobeynikova: investigation, formal analysis, writing—original draft; M.A. Tsyganova, Ya.A. Venerina: investigation, data curation; T.D. Dzhebrailova: writing—original draft, writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any

part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of the Sechenov University (Minutes No. 10-24 of April 18, 2024).

Consent for publication: All participants provided written informed consent prior to enrollment.

Funding sources: The study was conducted under a State Assignment.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Meinert EK, Solovyev AV. The effect of tonal acoustic noise with a frequency of 100 Hz on simple human sensorimotor reactions. In: *Actual problems of radiophysics APR-2021: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. Tomsk; 2021. P. 257–259. (In Russ.) EDN: AEWWCL
- Rakhimbekov MS. The impact of electromagnetic radiation on human. *Occupational Hygiene and Medical Ecology*. 2017;(3):3–11.
- Bagherli J, Vaez M, Mokhtari P. Effects of arousal and activation on simple and discriminative reaction time in a stimulated arousal state. *World Applied Sciences Journal*. 2011;12(10):1877–1882. EDN: YBLTLZ
- Taleeva AI, Madumarova IT, Zvyagina NV. The success of cognitive activity of students of the northern (arctic) federal university with different levels of anxiety in different time conditions. *Journal of Ural Medical Academic Science*. 2021;18(1):52–59. doi: 10.22138/2500-0918-2021-18-1-52-59 EDN: GQLLHY
- Vishnevskaya NL, Plakhova LV, Liskova MYu. Problems of improving working capacity of the operators at high-tech industries. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(8):39–44. doi: 10.24000/0409-2961-2021-8-39-44 EDN: BSZGPT
- Papenberg G, Hämmerer D, Müller V, et al. Lower theta inter-trial phase coherence during performance monitoring is related to higher reaction time variability: a lifespan study. *Neuroimage*. 2013;83:912–920. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.07.032
- Zaitsev AV, Lupandin VI, Surnina OE. Reaction time in theoretical and applied research. *Psychological Bulletin of the Ural State University*. 2002;(3):3–20. (In Russ.) EDN: JSPZCL
- Rommelse NN, Geurts HM, Franke B, et al. A review on cognitive and brain endophenotypes that may be common in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder and facilitate the search for pleiotropic genes. *Neurosci Biobehav Rev*. 2011;35(6):1363–1396. doi: 10.1016/j.neubiorev.2011.02.015
- Korobeynikova II. The correlation of reaction times properties with psychophysiological characteristics, academic achievement and EEG indices in humans. *Psikhologicheskii Zhurnal*. 2000;21(3):132–136. EDN: TBVNPf
- Terao Y, Ugawa Y, Suzuki M, et al. Shortening of simple reaction time by peripheral electrical and submotor-threshold magnetic cortical stimulation. *Exp Brain Res*. 1997;115(3):541–545. doi: 10.1007/pl00005724
- Henao D, Navarrete M, Valderrama M, Le Van Quyen M. Entrainment and synchronization of brain oscillations to auditory stimulations. *Neurosci Res*. 2020;156:271–278. doi: 10.1016/j.neures.2020.03.004
- Wearden JH, Williams EA, Jones LA. What speeds up the internal clock? Effects of clicks and flicker on duration judgements and reaction time. *Q J Exp Psychol*. 2017;70(3):488–503. doi: 10.1080/17470218.2015.1135971
- Akhraev NM, Baranova YuA, Vasileva MV, Romanovsky MN. Rhythmic stimulation of human operator throughput. *Fundamental Problems of Electronic Instrumentation*. 2015;15(5):60–63. (In Russ.) EDN: VOUFTP
- Gulbinaite R, van Viegen T, Wieling M, et al. individual alpha peak frequency predicts 10 Hz flicker effects on selective attention. *J Neurosci*. 2017;37(42):10173–10184. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1163-17.2017
- Klimovitch G. Startle response and muscular fatigue effects upon fractionated hand grip reaction time. *J Mot Behav*. 1977;9(4):285–292. doi: 10.1080/00222895.1977.10735120
- Hanson C, Lofthus GK. Effects of fatigue and laterality on fractionated reaction time. *J Mot Behav*. 1978;10(3):177–184. doi: 10.1080/00222895.1978.10735151
- Oude Lohuis MN, Pie JL, Marchesi P, et al. Task complexity temporally extends the causal requirement for visual cortex in perception. *bioRxiv*. Preprint: June 22, 2021. doi: 10.1101/2021.06.22.449366
- Neznamov GG, Teleshova ES, Synyakov SA, et al. The effect of Ladasten on the characteristics of the psychophysiological state and cognitive functions in patients with psychogenic asthenic disorders. *Psychiatry and Psychopharmacotherapy*. 2009;11(2):14–19. (In Russ.) EDN: NDGFVL
- Korobeynikova II, Karatygin NA, Pertsov SS. Analysis of endogenous spectral power of electroencephalogram alpha range biopotentials during the mnemonic activity under conditions of rhythmically organized optical stimulation. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2021;171(6):676–680. doi: 10.47056/0365-9615-2021-171-6-676-680
- Samuel IBH, Wang C, Hu Z, Ding M. The frequency of alpha oscillations: Task-dependent modulation and its functional significance. *Neuroimage*. 2018;183:897–906. doi: 10.1016/j.neuroimage.2018.08.063
- Balioz NV, Arkhipova EE, Mozolevskaya NV, Krivoshchekov SG. Electroencephalographic markers of CNS functional state in sport. *Ulyanovsk Medico-biological Journal*. 2023;(3):30–48. doi: 10.34014/2227-1848-2023-3-30-48 EDN: KOTLOG
- Karatygin NA, Korobeynikova II, Venerina YaA, et al. Influence of rhythmic optical stimulation on temporal parameters of human sensorimotor response and their relation to the spectral characteristics of the initial EEG. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2024;178(8):136–140. doi: 10.47056/0365-9615-2024-178-8-136-140 EDN: CRDNJT
- Ronconi L, Busch NA, Melcher D. Alpha-band sensory entrainment alters the duration of temporal windows in visual perception. *Sci Rep*. 2018;8(1):11810. doi: 10.1038/s41598-018-29671-5

24. Notbohm A, Kurths J, Herrmann CS. Modification of brain oscillations via rhythmic light stimulation provides evidence for entrainment but not for superposition of event-related responses. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:10. doi: 10.3389/fnhum.2016.00010
25. Gramfort A, Luessi M, Larson E, et al. MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Front Neurosci*. 2013;7:267. doi: 10.3389/fnins.2013.00267
26. Katyal S, He S, He B, Engel SA. Frequency of alpha oscillation predicts individual differences in perceptual stability during binocular rivalry. *Hum Brain Mapp*. 2019;40(8):2422–2433. doi: 10.1002/hbm.24533
27. Samaha J, Postle BR. The speed of alpha-band oscillations predicts the temporal resolution of visual perception. *Curr Biol*. 2015;25(22):2985–2990. doi: 10.1016/j.cub.2015.10.007
28. Hülzdünker T, Mierau A. Visual perception and visuomotor reaction speed are independent of the individual alpha frequency. *Front Neurosci*. 2021;15:620266. doi: 10.3389/fnins.2021.620266
29. Trajkovic J, Sack AT, Romei V. EEG-based biomarkers predict individual differences in TMS-induced entrainment of intrinsic brain rhythms. *Brain Stimul*. 2024;17(2):224–232. doi: 10.1016/j.brs.2024.02.016
30. Heckhausen H. *Motivation and Activity*. Saint Petersburg: Piter; 2003. 860 p. (In Russ.) ISBN: 5-94723-389-4
31. Zhang Y, Zhang Y, Cai P, et al. The causal role of α -oscillations in feature binding. *Proc Nat Acad Sci*. 2019;116(34):17023–17028. doi: 10.1073/pnas.1904160116
32. Lebedev AN. Konstanta M.N. Livanov's constant and psychophysiological regularities of brain functioning (to 100-th anniversary). *Psikhologicheskii Zhurnal*. 2008;29(1):133–137. EDN: INMIWB

ОБ АВТОРАХ

* **Коробейникова Ирина Ивановна**, канд. биол. наук;
адрес: Россия, 125315, Москва, Балтийская, д. 8;
ORCID: 0000-0001-7570-6321;
eLibrary SPIN: 2829-9765;
e-mail: korobejnikova_ii@academpharm.ru

Каратыгин Николай Алексеевич, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0001-5523-4048;
eLibrary SPIN: 7360-2272;
e-mail: karatygin_na@academpharm.ru

Цыганова Маргарита Андреевна;
ORCID: 0000-0002-7641-2330;
eLibrary SPIN: 7968-0651;
e-mail: oplatchikova_m_a@staff.sechenov.ru

Венерина Яна Андреевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-3460-078X;
eLibrary SPIN: 6689-8898;
e-mail: y.a.venerina@yandex.ru

Джебраилова Тамара Джебраиловна, д-р биол. наук,
профессор;
ORCID: 0000-0003-1454-9224;
eLibrary SPIN: 6942-3352;
e-mail: dzhebrailova@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Irina I. Korobeinikova**, Cand. Sci. (Biology);
address: 8 Baltiyskaya st, Moscow, Russia, 125315;
ORCID: 0000-0001-7570-6321;
eLibrary SPIN: 2829-9765;
e-mail: korobejnikova_ii@academpharm.ru

Nikolay A. Karatygin, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0001-5523-4048;
eLibrary SPIN: 7360-2272;
e-mail: karatygin_na@academpharm.ru

Margarita A. Tsyganova;
ORCID: 0000-0002-7641-2330;
eLibrary SPIN: 7968-0651;
e-mail: oplatchikova_m_a@staff.sechenov.ru

Yana A. Venerina, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-3460-078X;
eLibrary SPIN: 6689-8898;
e-mail: y.a.venerina@yandex.ru

Tamara D. Dzhebrailova, Dr. Sci. (Biology),
Professor;
ORCID: 0000-0003-1454-9224;
eLibrary SPIN: 6942-3352;
e-mail: dzhebrailova@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297>

EDN: RZSDPJ

Взаимосвязь субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте

В.Б. Никишина¹, Е.А. Петраш¹, А.А. Лисичкина¹, И.А. Кучерявенко²¹ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия;² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Актуальность исследования обусловлена, с одной стороны, увеличением доли населения пожилого и старческого возраста в структуре общества практически во всех странах мира, с другой стороны — увеличением количества преступлений в отношении людей пожилого возраста, особенно в сфере мошенничества с использованием телефонной коммуникации.

Цель. Изучение взаимосвязи субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте.

Методы. Исследование осуществлялось на базе Российского геронтологического научно-клинического центра в три этапа: изучение способности фактического распознавания обмана; изучение субъективной оценки доверчивости; оценка взаимосвязи показателей распознавания обмана и субъективного показателя доверчивости. Объём выборки составил 60 человек: 36 человек пожилого (60–75 лет) и 24 человека старческого (76–90 лет) возраста. Критериями включения в выборку являлись сохранённый нейрокогнитивный статус, отсутствие тяжёлых хронических соматических и психических заболеваний, сохранность функционирования анализаторных систем, отсутствие в анамнезе нарушений мозгового кровообращения. Использовали следующие методы исследования: МоСа-тест; методика Pragmatic Interpretation Short Stories Winner's Task в адаптации Н.И. Колесовой и Е.А. Сергиенко, методика Дембо–Рубинштейн, шкала субъективного ощущения одиночества Д. Расселла, Л. Пепло, М. Фергюсона. Количественную оценку проводили с использованием методов описательной, сравнительной, корреляционной и многомерной статистики.

Результаты. В результате оценки взаимосвязи уровня субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте статистически значимых взаимосвязей не выявлено. Однако процедура факторизации показала, что около 40% испытуемых заблуждаются относительно своей способности распознавать обман вне зависимости от фактического уровня распознавания обмана.

Заключение. Лица пожилого и старческого возраста характеризуются схожим уровнем способности к распознаванию обмана. Низкий уровень распознавания обмана указанными возрастными группами обусловлен повышенной доверчивостью и невысокой субъективной оценкой собственных умственных способностей.

Ключевые слова: распознавание обмана; пожилой возраст; старческий возраст; доверчивость; обман.

Как цитировать:

Никишина В.Б., Петраш Е.А., Лисичкина А.А., Кучерявенко И.А. Взаимосвязь субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. 745–755. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297> EDN: RZSDPJ

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297>

EDN: RZSDPJ

Association Between Subjective Credulity Assessment and Judging Deception in Older Adults

Vera B. Nikishina¹, Ekaterina A. Petrash¹, Alyona A. Lisichkina¹, Igor A. Kucheryavenko²¹ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia;² Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The work is relevant, given the increasing proportion of older adults worldwide, as well as the growing rates of crimes against older people, notably phone fraud.

AIM: The work aimed to assess the association between subjective credulity assessment and judging deception in older adults.

METHODS: The study was conducted at the Russian Research and Clinical Center for Gerontology. It included three stages: assessing the actual ability to detect deception; subjective credulity assessment; and assessing the association between judging deception and subjective credulity. The study included 60 older participants (60–75 years, $n = 36$; 76–90 years, $n = 24$). Inclusion criteria were as follows: preserved neurocognitive function; absence of severe chronic medical conditions and mental disorders; preserved analytical capability; and no history of cerebrovascular accidents. The following assessment tools were used: Montreal Cognitive Assessment (MoCA); Pragmatic Interpretation Short Stories Winner's Task (modified by Kolesova and Sergienko); Dembo–Rubinstein test; and UCLA Loneliness Scale (by Russell, Peplau, and Ferguson). Descriptive, comparative, correlation, and multivariate statistics were used for quantitative assessment.

RESULTS: No significant relationships were found when examining the association between subjective credulity assessment and judging deception in older adults. However, following factorization, approximately 40% of participants were found to misjudge their ability to detect deception, irrespective of the actual accuracy of deception judgments.

CONCLUSION: The two groups of older adults (60–75 years and 76–90 years) showed comparable ability to detect deception. Low ability to detect deception in these age groups is related to increased credulity and low subjective assessment of own mental capacity.

Keywords: judging deception; older age; senile age; credulity; deception.

To cite this article:

Nikishina VB, Petrash EA, Lisichkina AA, Kucheryavenko IA. Association Between Subjective Credulity Assessment and Judging Deception in Older Adults. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):745–755. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297> EDN: RZSDPJ

Received: 28.06.2025

Accepted: 03.10.2025

Published online: 27.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297>

EDN: RZSDPJ

老年期与高龄期人群主观轻信性自评与欺骗识别能力之间的关系

Vera B. Nikishina¹, Ekaterina A. Petrash¹, Alyona A. Lisichkina¹, Igor A. Kucheryavenko²¹ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia;² Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

摘要

论证。研究的现实意义在于：一方面，全球多数国家社会人口结构中老年期与高龄期人群比例持续上升；另一方面，针对该人群的犯罪数量亦逐年增加，尤其是基于电话通讯的诈骗行为。

目的。探讨老年期与高龄期个体主观轻信性自评与欺骗识别能力之间的关系。

方法。研究在Russian Clinical and Research Center of Gerontology开展，共分三个阶段：评估实际欺骗识别能力；评估主观轻信性自评；分析两者之间的关联。样本共60名受试者：老年期36人（60 – 75岁），高龄期24人（76 – 90岁）。纳入标准包括：认知状态完整、无严重慢性躯体与精神疾病、感觉系统功能保留、无脑血流障碍病史。采用MoCA测试、Pragmatic Interpretation Short Stories Winner's Task (Kolesova和Sergienko改编版)、Dembo-Rubinstein方法及Russell、Peplau、Ferguson主观孤独感量表。定量评估采用描述性、比较性、相关性及多变量统计方法。

结果。在对老年与高龄人群主观轻信程度与欺骗识别能力之间关系进行评估后，未发现统计学显著关联。然而因素分析显示，约40%的受试者对自身欺骗识别能力存在错误判断，与其实际识别水平无关。

结论。老年期与高龄期人群在欺骗识别能力上表现接近。该年龄阶段欺骗识别能力较低与较高的轻信倾向以及对自身认知能力较低的主观评价相关。

关键词：欺骗识别；老年期；高龄期；轻信；欺骗。

引用本文：

Nikishina VB, Petrash EA, Lisichkina AA, Kucheryavenko IA. 老年期与高龄期人群主观轻信性自评与欺骗识别能力之间的关系. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):745–755. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco686297> EDN: RZSDPJ

收到: 8.06.2025

接受: 03.10.2025

发布日期: 27.10.2025

ОБОСНОВАНИЕ

В XXI в. происходит увеличение доли населения пожилого и старческого возраста в структуре общества практически во всех странах мира. Если XX в. был ознаменован ростом численности населения, то XXI называют веком старения населения Земли¹. По данным доклада Организации Объединенных Наций от 2022 г. «Мировые демографические перспективы», количество людей возрастной группы 65 лет и старше растёт быстрее по сравнению с другими. Согласно прогнозам, к 2050 г. число людей указанной возрастной группы во всём мире будет превышать в два раза число детей до пятилетнего возраста и будет почти равным количеству детей в возрасте до 12 лет. При рассмотрении динамики старения становится видна новая возрастная группа — люди 80 лет и старше. В 2022 г. их доля составила 2%, в 2050 г. прогнозируется около 5%, а к концу XXI в. — около 10% [1].

В последние годы увеличивается количество преступлений в отношении людей пожилого возраста, особенно в сфере мошенничества. По данным МВД России, в 2021 г. около 20% потерпевших в делах о мошенничестве были старше 60 лет², при этом доля таких преступлений в общей структуре правонарушений возросла (2024 г. — 23,4% в сравнении с аналогичным периодом 2023 г. — 21,6%). Значительная часть таких преступлений осуществляется посредством телефонной коммуникации.

Важно отметить, что сенсорные функциональные системы исследуемой возрастной группы формировались вне условий технического воздействия и средств опосредования коммуникации, а именно мобильных устройств, мессенджеров, что, в свою очередь, приводит к затруднениям процесса коммуникации, опосредованного техническими средствами в части высокого уровня доверия.

Закономерные онтогенетические изменения, в том числе и когнитивных функций (таких как память, внимание, гнозис), которые на этапах пожилого и старческого возраста меняют свои характеристики, структуру и механизмы, приводят к большей манипулятивной доступности и, как следствие, снижают на этих основаниях способность к распознаванию обмана.

Распознавание обмана — сложный процесс, требующий способности понимать и интерпретировать собственное психическое состояние и психическое состояние другого человека.

В качестве методологического основания нашего исследования выступают положения теории о модели

психического состояния (Theory of mind), разработанной Д. Примаком и Г. Вудраффом [2]. Модель психического возникла в рамках когнитивной психологии и представляет собой идею способности человека понимать, интерпретировать, предсказывать поведение других людей на основании их внешних проявлений, мыслей, поведения.

Положения данной теории позволяют соединить понятия психики и ментальной репрезентации, а также семантически обозначить и продемонстрировать их связь с объективным миром. Термин «репрезентация» обозначает внутренние структуры, формирующие представленность, отображение для себя. Понятие ментальных репрезентаций становится центральным не только для когнитивной психологии, но и для психофизиологии, психолингвистики [3].

Авторы Theory of mind в модели психического предположили различать два структурных компонента. Когнитивный («холодный») компонент включает в себя когнитивную обработку мыслей, убеждений, намерений других людей, понимание небуквальных высказываний. Внутри когнитивного компонента различают репрезентации первого и второго порядка. Репрезентации первого порядка представляют собой репрезентацию собственных мыслей индивида, появляющихся путём формирования своей точки зрения («я думаю, что она считает, что...»). Таким образом, мы имеем способность понимать, что другие обладают сознанием, восприятием, отличным от нашего. Репрезентации второго порядка являются более сложными конструкциями глубинных представлений о себе и предполагают принятие одновременно двух точек зрения («он думает, что она думает, что...»), дают нам возможность думать о прошлом, будущем, о том, что не существует, отражать объекты не только в реальности, но и то, какими они могли бы быть, и, что наиболее важно, строить причинные гипотезы. При этом в первую очередь в онтогенезе развиваются репрезентации первого порядка.

Эмоциональный («горячий») компонент модели психического включает в себя понимание чувств, эмоций, аффективных состояний других людей. Следует провести дифференциацию между схожими на первый взгляд понятиями «эмпатия» и «эмоциональный компонент». Эмпатия подразумевает под собой способность к ощущению и переживанию эмоций, чувств другого человека, при этом не обязательно включает понимание причины, вызвавшей их. В то время как эмоциональный компонент предполагает способность принять точку зрения другого («встать на его место») с истинным пониманием его психического состояния без необходимости сопереживания его эмоциям и чувствам.

Модель психического Д. Примака и Г. Вудраффа позволяет рассмотреть когнитивные и эмоциональные составляющие способности к распознаванию обмана и доверчивости. Доверчивость может пониматься как приписывание большей авторитетности чужой репрезентации в сравнении с собственной. Способность понимать обман

¹ United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. Режим доступа: <https://www.un.org/development/desa/pd/> Дата обращения: 17.04.2025.

² Информационно-правовой портал Гарант.ру. Справочно-правовая система, 1990. Режим доступа: <https://www.garant.ru/news/1654594/> Дата обращения: 15.04.2025.

основана в первую очередь на допущении, что другие не только могут, но и хотят ввести в заблуждение собеседника.

Распознавание обмана представляет собой сложный процесс, требующий способности понимать и интерпретировать собственное психическое состояние и психическое состояние другого человека. Оно зависит от многих факторов, в том числе от онтогенетически закономерных изменений когнитивных функций, социально-психологических факторов (сужение круга социальных контактов и социального окружения, приводящих к чувству одиночества), а также изменения уровня доверчивости к другим людям. Уровень доверчивости, в свою очередь, определяется, с одной стороны, реализацией потребностей в социальном взаимодействии, с другой — «пониманием» других людей, которое лежит в основе способности к распознаванию обмана).

Изучение распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте, а также факторов, которые с ним взаимосвязаны, является актуальным и необходимым для выявления лиц, составляющих группу риска, максимально подверженных (уязвимых) мошенническим действиям.

Цель исследования. Изучение взаимосвязи субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте.

МЕТОДЫ

Общий объём исследовательской выборки составил 60 респондентов: 36 человек (26 женщин и 10 мужчин) пожилого (60–75 лет) возраста, 24 (15 женщин и 9 мужчин) — старческого (76–90 лет). Базой исследования выступил Российский геронтологический научно-клинический центр ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Москва). Все испытуемые имели близких родственников (детей, внуков, супругов, братьев/сестёр), то есть не являлись одиночками, проживали либо отдельно, либо совместно с родственниками. Все участники исследования предварительно добровольно подписали форму информированного согласия, утверждённую в составе протокола исследования этическим комитетом (этическая комиссия Института клинической психологии и социальной работы ИКПСР ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, выписка из протокола № 17 от 23.10.2023). Исследование проводилось в период с 01.02.2025 по 15.05.2025. Критерием включения испытуемых в выборку являлся сохранённый нейрокогнитивный статус, который оценивали с использованием Монреальской шкалы оценки когнитивных функций — МоСА-тест [4]. В соответствии с критериями включения и исключения в исследовании принимали участие респонденты пожилого и старческого возраста, не имеющие тяжёлых хронических соматических, психических заболеваний и нарушений мозгового кровообращения в анамнезе, обладающие сохранёнными аналитическими системами и показателями

оценки состояния когнитивных функций по шкале МоСА не менее 26 баллов.

Представляемое исследование по типу соответствует поперечному (одномоментному).

Организация исследования включала в себя три этапа. На первом этапе решалась задача изучения распознавания обмана с использованием методики Pragmatic Interpretation Short Stories Winner's Task [5] в адаптации Н.И. Колесовой и Е.А. Сергиенко [3], позволяющей оценить фактический уровень способности распознавания обмана. Методика состоит из 10 рассказов двух типов — включающих обман или иронию. Общий объём каждого рассказа составляет примерно 250 слов. В представляемом исследовании методика была сокращена до шести историй из-за нейродинамических особенностей исследуемой возрастной группы. В каждой истории содержится 6 вопросов (пример представлен на рис. 1), типы вопросов представлены в табл. 1. Верный ответ приравнивается к одному баллу, таким образом, максимальный возможный балл в данной методике равен 36.

Каждая история описывает какое-либо событие, что позволяет рассмотреть специфику построенной когнитивной модели. Данная методика адаптирована с учётом возрастной группы, а также культурных особенностей, чтобы истории находили эмоциональный отклик среди людей пожилого возраста.

Стандартная инструкция сообщает, что респонденту будут представлены различные истории, описывающие проступки людей. В ходе прочтения истории будет предложено ответить на ряд вопросов.

В исследовании мы представляли каждую историю в нарративном формате, чтобы в наибольшей степени приблизить ситуацию исследования к обстоятельствам жизни, а именно ситуации, когда с пожилым человеком пытаются контактировать мошенники с помощью мобильных устройств. Изучение понимания обмана с использованием адаптированной методики Pragmatic Interpretation Short Stories Winner's Task позволяет оценить когнитивный компонент модели психического.

Задачей второго этапа являлась субъективная оценка доверчивости с использованием методики Дембо–Рубинштейн. В соответствии с задачей исследования была использована только одна стандартная шкала — «ум», к которой были добавлены шкалы «доверчивость» и «способность к распознаванию обмана». Добавочные шкалы выступали в качестве маркёров субъективной оценки уровня доверчивости испытуемых и способности идентифицировать обман. Интерпретацию шкал субъективной самооценки изучаемых показателей на качественном уровне осуществляли в соответствии с диапазонами значений методики Дембо–Рубинштейн: 0,0–5,9 (0–59 мм) — низкая; 6,0–7,0 (60–69 мм) — средняя; 7,1–10,0 (71–100 мм) — высокая. Также на данном этапе оценивали субъективные ощущения одиночества, рассматриваемого в контексте представляемого исследования

во взаимосвязи с доверчивостью. В связи с этим использовали шкалу субъективного ощущения одиночества (UCLA Loneliness Scale), разработанную в 1978 г. Д. Расселлом, Л. Пепло, М. Фергюсоном.

Задачей третьего этапа являлось изучение взаимосвязи субъективной оценки доверчивости и способности

распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте с использованием коэффициента ранговой корреляции (r) Спирмена ($p < 0,05$).

Количественно результаты оценивали с использованием методов описательной статистики (среднее значение, стандартное отклонение, мода, медиана, минимальное

История 2

Анастасия испекла печенье для школьной ярмарки дочки и попросила своего мужа Андрея не есть ни одного, так как ему необходимо соблюдать строгую диету. Анастасия вышла на прогулку с собакой. В это время из школы вернулась их дочь Лиза. Андрей был голоден, он не смог сдержаться и, пока дочка мыла руки, стал есть печенье.

1. Съел ли Андрей печенье? Да/нет

В это время Анастасия вернулась домой, так как на улице оказалось холодно, и увидела, что Андрей ест печенье для ярмарки дочери.

2. Поняла ли Анастасия, что её супруг не сдержался и ел печенье? Да/нет

На кухне она рассерженно взглянула на мужа, державшего в одной руке половину печенья, и вышла. В это время на кухню зашла Лиза и спросила папу: «Зачем ты съел печенье для школьной ярмарки? Что нам скажет мама?»

3. Что ответил Андрей?

А) мама видела, но они были такие вкусные, что нам придется попросить её испечь ещё

В) мама не знает, что я их съел, а мы с тобой купим печенье в магазине завтра перед школой

4. Понимал ли Андрей, что сказанное им правда? Да/нет

Анастасия вернулась на кухню и спросила супруга, тяжело ли ему было сегодня придерживаться строгой диеты. Он ответил, что сегодня не съел ничего, что могло бы повредить его здоровью.

5. Когда Андрей дал такой ответ, думал ли он, что жена поверит ему? Да/нет

6. Когда Андрей ответил, что сегодня он не съел ничего, что могло бы повредить его здоровью, он:

А) соврал, чтобы не быть пойманным

Б) хотел отшутиться, чтобы скрыть свою неловкость и сгладить ситуацию

Рис. 1. Пример истории на распознавание обмана из теста прагматической интерпретации жизненных событий E. Winner с соавт. [5] в адаптации Н.И. Колесовой и Е.А. Сергиенко.

Fig. 1. Example of a story from the Pragmatic Interpretation Short Stories Winner’s Task [5] (modified by Kolesova and Sergienko).

Таблица 1. Типы вопросов в тесте оценки способности прагматической интерпретации жизненных обстоятельств

Table 1. Types of questions in the test for assessing the ability of pragmatic interpretation of life circumstances

1-й вопрос	Съел ли Андрей печенье?	Фактический вопрос. Задаётся, чтобы утвердиться, что респондент понимает сюжет, запоминает и сохраняет в памяти определённое количество информации, а также чтобы имел возможность понять в конце рассказа, что последнее утверждение героя рассказа ложно
2-й вопрос	Поняла ли Анастасия, что её супруг не сдержался и ел печенье?	Вопрос на понимание психического состояния первого порядка. Требует от респондента понимания психического состояния героя рассказа, а именно, знает ли он правду об обманном проступке другого персонажа
3-й вопрос	Что ответил Андрей?	Вопрос на понимание психического состояния второго порядка. Требует от респондента понимания репрезентации психического состояния множества людей одновременно — представления о знаниях героя рассказа относительно знаний обманутого персонажа
4-й вопрос	Понимал ли Андрей, что сказанное им правда?	Уточняющий вопрос второго порядка. Задаётся респонденту в случае неверного ответа на предыдущий вопрос, так как ответ может варьировать в зависимости от того, каким образом респондент характеризует персонажей, при этом понимание репрезентаций второго порядка может оставаться интактным. При верном ответе на данный вопрос предыдущий ответ засчитывается как верный
5-й вопрос	Когда Андрей дал такой ответ, думал ли он, что жена поверит ему?	Вопрос ожидания. Оценивает рассуждения испытуемого о понимании репрезентаций второго порядка у героя-лжеца после того, как он услышал историю целиком
6-й вопрос	Когда Андрей ответил, что сегодня он не съел ничего, что могло бы повредить его здоровью, он соврал, чтобы не быть пойманным, или хотел отшутиться, чтобы скрыть свою неловкость?	Вопрос на понимание обмана. Оценивает способность интегрировать всю информацию из истории и определить, различает ли испытуемый шуточные и обманчивые, заведомо ложные высказывания

и максимальные значения). Сравнительный анализ осуществляли с использованием критерия Колмогорова–Смирнова для оценки нормальности распределения исследуемых признаков, а также непараметрического критерия Манна–Уитни, так как распределение исследуемых признаков не соответствует нормальному. Взаимосвязи исследуемых параметров оценивали методами корреляционной (критерий ранговой корреляции Спирмена) и многомерной статистики (процедура факторного анализа с varimax-вращением). Статистический анализ проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 12.0 (ПВСО Software Inc., США) и языка программирования для статистической обработки данных R 4.22.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате изучения распознавания обмана с использованием модифицированной методики Pragmatic Interpretation Short Stories Winner’s Task в адаптации Н.И. Колесовой и Е.А. Сергиенко [3] было установлено отсутствие статистически значимых различий показателей распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте. Выявленный показатель соответствует среднему уровню распознавания обмана в обеих возрастных группах. Механизм распознавания обмана содержит в себе два

структурных взаимосвязанных элемента: распознавание иронии и распознавание обмана. Средние значения этих показателей в пожилом и старческом возрасте также не имеют значимых различий (рис. 2).

Для выявления различий в исследуемых возрастных группах применяли непараметрический *U*-критерий Манна–Уитни. Результаты сравнительного анализа показателей распознавания обмана и иронии в пожилом и старческом возрасте представлены в табл. 2.

При сравнительном анализе показателей распознавания обмана людьми в пожилом и старческом возрасте установлено отсутствие статистически значимых различий в данных возрастных группах. Полученные результаты дают основание для объединения исследуемых групп в общую выборку для дальнейшего количественного и качественного анализа взаимосвязи субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте.

При изучении субъективных оценок доверчивости, включающих показатели самооценки доверчивости, способности распознавания обмана, умственных способностей и одиночества, установлено, что средние значения субъективного и реального уровней способности распознавать обман среди пожилых людей и людей старческого возраста соответствуют высокому уровню. Также высокий

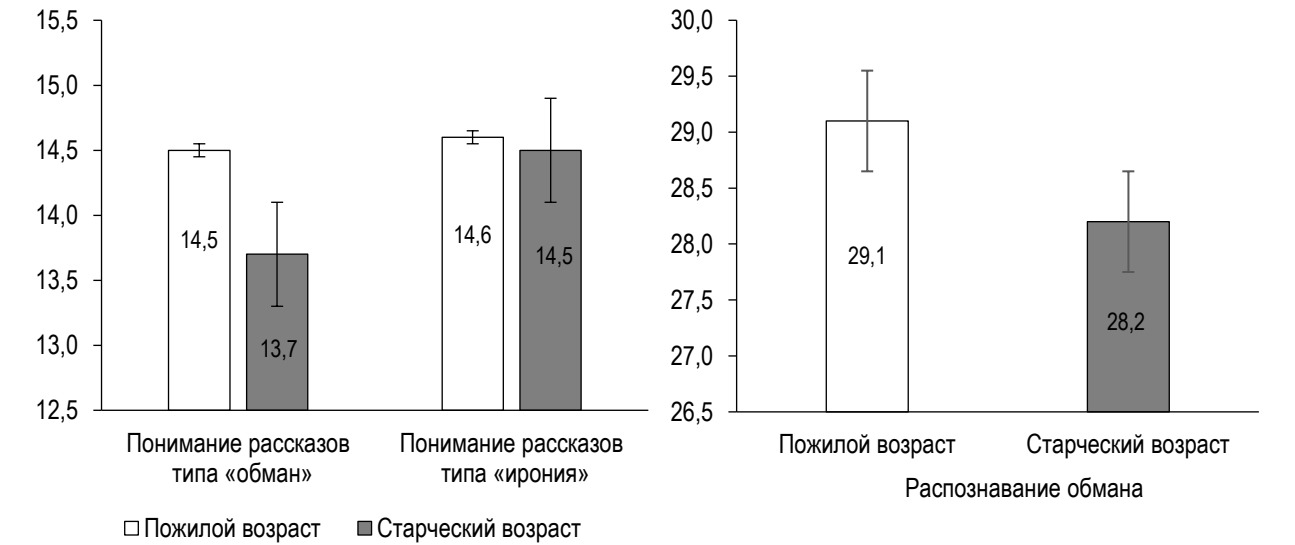


Рис. 2. Гистограмма средних значений показателей обмана и иронии и показателей распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте.
Fig. 2. Histogram of mean lie and ironic joke parameters and deception judgment parameters in older age.

Таблица 2. Анализ различий показателей распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте при помощи критерия Манна–Уитни
Table 2. Differences in judging deception in older age using the Mann–Whitney test

Исследуемые показатели	Медиана		U-критерий Манна–Уитни	p-уровень
	Пожилой возраст	Старческий возраст		
Общий уровень распознавания обмана	28	28	286,0	0,725
Распознавание обмана	14,5	13,5	306,5	0,985
Распознавание иронии	14,5	14,5	263,0	0,437

Примечание. *p* — уровень значимости для критерия Манна–Уитни.

уровень выявлен по такому показателю, как субъективная оценка доверчивости (табл. 3).

Выявлено, что для людей старческого и пожилого возрастов характерен средний уровень одиночества и субъективной оценки умственных способностей.

В ходе сравнительного анализа значимых различий исследуемых признаков у лиц старческого и пожилого возраста с разным уровнем способности к распознаванию обмана не выявлено.

В результате решения задачи изучения взаимосвязи уровня субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте при использовании процедуры корреляционного анализа (r -критерий ранговой корреляции Спирмена, $p < 0,05$) статистически значимых взаимосвязей не выявлено (табл. 4).

Однако выявлена прямо пропорциональная связь средней силы одиночества и возраста ($r=0,303$, $p < 0,05$).

Так как процедура корреляционного анализа не выявила статистически значимых взаимосвязей показателей уровня субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте, было принято решение о проведении факторного анализа с *varimax*-вращением. Данная процедура проводилась по группам респондентов, сформированным по критерию уровня фактического распознавания обмана: группа лиц пожилого и старческого возраста с высоким уровнем распознавания обмана; группа лиц

пожилого и старческого возраста с низким уровнем распознавания обмана.

В результате процедуры факторизации в обеих группах лиц пожилого и старческого возраста вне зависимости от уровня распознавания обмана было выделено по четыре фактора (рис. 3).

В группе лиц пожилого и старческого возраста с высоким уровнем распознавания обмана первый фактор с максимальной факторной нагрузкой включает в себя показатели субъективной оценки доверчивости и ощущение одиночества (0,537 и 0,496). Второй фактор представлен показателями субъективного (0,522) и объективного (–0,548) распознавания обмана. Содержание третьего фактора составили показатели распознавания обмана с субъективной оценкой доверчивости и умственных способностей. Четвёртый фактор содержательно представлен компонентами субъективной оценки распознавания обмана и ощущения одиночества.

В группе лиц пожилого и старческого возраста с низким уровнем распознавания обмана первый фактор с максимальной факторной нагрузкой включает в себя показатели субъективной оценки доверчивости (0,522), ощущение одиночества и распознавание обмана. Второй фактор представлен показателями субъективной оценки доверчивости и распознавания обмана. Содержание третьего фактора составили показатели субъективной оценки умственных способностей и субъективной оценки распознавания обмана. Четвёртый фактор содержательно

Таблица 3. Результаты анализа показателей субъективной оценки и уровня одиночества у людей в пожилом и старческом возрасте с применением первичных описательных статистик

Table 3. Subjective self-assessment and loneliness parameters in older age using primary descriptive statistics

Показатель	Среднее	Стандартное отклонение	Мода	Медиана	Минимум	Максимум
Субъективная оценка умственных способностей	6,97	1,54	7	7	4	10
Субъективная оценка доверчивости	7,03	2,55	8	8	0	10
Субъективная оценка способности распознавать обман	7,38	1,85	7	7,5	0	10
Одиночество	33,83	6,78	32	32	24	57

Таблица 4. Связь между способностью распознавать обман, одиночеством и возрастом

Table 4. Association between judging deception, loneliness, and age

Показатель	Корреляция	Возраст	Одиночество	Способность распознавать обман
Субъективная оценка способности распознавать обман	Коэффициент корреляции	–0,076	–0,072	–0,157
	Уровень значимости p	0,566	0,584	0,229
Субъективная оценка доверчивости	Коэффициент корреляции	–0,137	0,047	–0,126
	Уровень значимости p	0,296	0,719	0,337
Субъективная оценка умственных способностей	Коэффициент корреляции	0,038	–0,198	0,213
	Уровень значимости p	0,774	0,129	0,102
Способность распознавать обман	Коэффициент корреляции	–0,067	–0,216	1,000
	Уровень значимости p	0,613	0,098	—

Группа лиц пожилого и старческого возраста с высоким уровнем распознавания обмана		Группа лиц пожилого и старческого возраста с низким уровнем распознавания обмана	
Компонентный состав:			
Фактор 1	– субъективная оценка доверчивости (0,537) – ощущение одиночества (0,496)	Фактор 1	– субъективная оценка доверчивости (0,522) – распознавание обмана (0,414) – ощущение одиночества (0,436)
Фактор 2	– распознавание обмана (–0,548) – субъективная оценка распознавания обмана (0,522)	Фактор 2	– распознавание обмана (–0,488) – субъективная оценка доверчивости (0,544)
Фактор 3	– распознавание обмана (0,429) – субъективная оценка доверчивости (0,574) – субъективная оценка умственных способностей (–0,743)	Фактор 3	– субъективная оценка умственных способностей (–0,722) – субъективная оценка распознавания обмана (0,524)
Фактор 4	– ощущение одиночества (–0,545) – субъективная оценка распознавания обмана (0,780)	Фактор 4	– ощущение одиночества (–0,545) – субъективная оценка распознавания обмана (0,733)

Рис. 3. Факторная структура взаимосвязи показателей уровня субъективной оценки доверчивости и способности распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте с учётом уровня фактического распознавания обмана.

Fig. 3. Factorized association between subjective credulity assessment and judging deception in older age, considering the actual ability to detect deception.

представлен компонентами субъективной оценки распознавания обмана и ощущения одиночества.

Первый фактор, обозначенный как «я слишком одинок, чтобы не доверять людям», в группах лиц пожилого и старческого возраста с высоким и низким уровнем распознавания обмана содержит показатели субъективной оценки доверчивости и ощущения одиночества. Однако в группе лиц с низким распознаванием обмана, помимо указанных компонентов, в первый фактор входит ещё фактическое распознавание обмана. Полученные данные позволяют подтвердить выдвинутое ранее предположение о том, что низкий уровень распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте связан с высокой доверчивостью и ощущением одиночества.

Второй фактор («я хорошо разбираюсь в людях и понимаю, когда они врут») вне зависимости от уровня распознавания обмана лицами пожилого и старческого возраста включает фактический показатель распознавания обмана, однако в группе с высоким уровнем также в содержание данного фактора входит субъективная оценка распознавания обмана, но с противоположным знаком (что указывает на несоответствие субъективного и объективного уровней распознавания обмана); при низком уровне — субъективная оценка доверчивости, которая, как и в предыдущем факторе, препятствует распознаванию обмана. Высокая уверенность в своих способностях распознавать обман связана с низким уровнем его распознавания, то есть, если человек вполне хорошо распознает обман, он становится уверенным в своей способности и потому ошибается. При низком распознавании обмана человек считает себя доверчивым — и действительно ошибается («научен горьким опытом»).

Третий фактор, названный «я не такой умный, чтобы распознать обман», «все обманывают, я не могу это отследить», в обеих группах включает в себя показатель субъективной оценки умственных способностей. При высоком уровне распознавания обмана в содержание данного фактора также входят субъективная оценка доверчивости и собственно показатель распознавания обмана, в группе лиц пожилого и старческого возраста с низким уровнем распознавания обмана — субъективная оценка распознавания обмана. Придирчивость лиц пожилого и старческого возраста к оценке своих способностей (не доверяет себе, считает доверчивым) может обеспечивать «внимательность к обману и собственно к его распознаванию».

Четвёртый фактор, который можно обозначить как «я не одинок и разбираюсь в людях», в обеих группах лиц пожилого и старческого возраста вне зависимости от уровня распознавания обмана содержательно представлен компонентами субъективной оценки распознавания обмана и ощущения одиночества. Люди не считают себя одинокими, так как хорошо разбираются в людях и понимают, когда те врут.

ОБСУЖДЕНИЕ

Поведение других людей не полностью предсказуемо, поэтому успех взаимодействия с социальной средой коррелирует со способностью человека расшифровывать ментальные состояния и интенции других. Наличие возрастных изменений в когнитивном (распознавание обмана) и эмоциональном (одинокость, субъективная оценка доверчивости и способности распознавать обман)

компонентах модели психического приводит к снижению чувствительности детекции сигналов, которые предупреждали бы о вероятных негативных, опасных действиях со стороны других людей. Этот факт превращает пожилых людей в более уязвимую категорию населения, подвергая их риску стать жертвой социальной эксплуатации, мошенничества, обмана, что приводит к повышенному уровню стресса, эмпатическому дистрессу, трудностям устанавливать дружеские и семейные отношения [6].

В результате проведённого сравнительного анализа показателей распознавания обмана людьми в пожилом и старческом возрасте установлено отсутствие статистически значимых различий в данных возрастных группах, то есть люди пожилого и старческого возраста имеют схожую способность к распознаванию обмана.

Существует тенденция прямой связи уровня распознавания обмана, субъективной оценки доверчивости и обратной — субъективной оценки умственных способностей в пожилом и старческом возрасте. При этом для людей пожилого и старческого возраста с заниженной оценкой своих умственных способностей характерна повышенная доверчивость, что может приводить к социальной дезадаптации и избеганию социальных контактов.

Полученные данные об отсутствии статистически значимых различий распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте не согласуются с рядом зарубежных исследований, показывающих резкое снижение в распознавании обмана людьми старческого возраста в сравнении с пожилыми [7, 8]. В работах А.И. Мелёхина [6] подчёркивается, что люди исследуемых возрастных групп демонстрируют некритичную доверчивость, что согласуется с полученными нами результатами о том, что 40% лиц пожилого и старческого возраста, принимавших участие в исследовании, ошибаются относительно своей способности к распознаванию обмана.

Наблюдаемая тенденция обратной связи уровня одиночества и субъективной оценки понимания обмана в пожилом и старческом возрасте подчёркивает роль необходимости в социальном взаимодействии. При этом среди людей указанных возрастных периодов преобладает высокий и средний уровень субъективного одиночества.

Ошибкам распознавания обмана в старческом возрасте способствует избыточная уверенность в своём умении распознавать обман. Уверенность в субъективной оценке способности в распознавании обмана обеспечивается низким уровнем чувства одиночества («все люди братья»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распознавание обмана в пожилом и старческом возрасте не связано с возрастным периодом (о чём указывает отсутствие значимых различий между группами лиц пожилого и старческого возраста). Результаты исследования свидетельствуют об отсутствии статистически значимых различий в способности распознавания обмана

в исследуемых возрастных периодах. Фактическая способность к распознаванию обмана не имеет взаимосвязи с субъективной оценкой способности распознавать обман, доверчивости и умственных способностей. В 40% случаев люди заблуждаются относительно своей способности распознавать обман. Профилактическая работа с пожилыми людьми с целью противодействия мошенническим действиям может строиться на снижении субъективной уверенности в умении распознавать обман (коммуникативные упражнения), поддержке критического мышления («каждый человек может ошибаться»), репрезентации своей доверчивости к посторонним людям как чрезмерной, требующей осторожности.

В качестве ограничений представленной работы следует отметить отсутствие сравнения результатов распознавания обмана в пожилом и старческом возрасте у мужчин и женщин. Данный аспект представляется перспективным для дальнейших исследований.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.Б. Никишина — планирование исследования, анализ литературы, сбор, анализ, интерпретация данных, подготовка и редактирование финального варианта рукописи; Е.А. Петраш — планирование исследования, анализ литературы, сбор, анализ, интерпретация данных, подготовка текста рукописи; А.А. Лисичкина — планирование исследования, анализ литературы, сбор, анализ, интерпретация эмпирических данных, подготовка текста рукописи; И.А. Кучерявенко — планирование исследования, анализ литературы, сбор, анализ, интерпретация эмпирических данных, подготовка текста рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Института клинической психологии и социальной работы ИКПСР ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (протокол № 17 от 23.10.2023).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: V.B. Nikishina: methodology, investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; E.A. Petrash: methodology, investigation, formal analysis, writing—original draft; A.A. Lisichkina: methodology, investigation, formal analysis, writing—original draft; I.A. Kucheryavenko: methodology, investigation, formal analysis, writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of the Institute of Clinical Psychology and Social Work, Pirogov Russian National Research Medical University (Minutes No. 17 of October 23, 2023). Consent for publication: All participants provided written informed consent prior to enrollment.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Kalabikhina IE, Kalmykova NM, Denisov BP, et al. *Demography: an electronic textbook*. Moscow: Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University; 2022. 560 p. (In Russ.)
URL: <https://books.econ.msu.ru/Demography/>
2. Premack D, Woodruff G. Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*. 1978;1(4):515–526.
doi: 10.1017/s0140525x00076512
3. Sergienko EA, Ulanova AY, Lebedeva EI. *Model of the mental: Structure and dynamics*. Moscow: Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences; 2020. 503 p. (In Russ.) ISBN: 978-5-9270-0420-1
4. Nasreddine ZS, Phillips NA, Bédirian V, et al. The montreal cognitive assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment. *J Am Geriatr Soc*. 2005;53(4):695–699.
doi: 10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x
5. Winner E, Leekam S, Brownell H, et al. Distinguishing lies from jokes: theory of mind deficits and discourse interpretation in right hemisphere brain-damaged patients. *Brain Lang*. 1998;62(1):89–106.
doi: 10.1006/brln.1997.1889
6. Melehin AI. Specificity of understanding of deception at presenile and senile age. *Psychology and Law*. 2019;9(4):187–210.
doi: 10.17759/psylaw.2019090414 EDN: KVQCSA
7. Bottiroli S, Cavallini E, Ceccato I, et al. Theory of mind in aging: comparing cognitive and affective components in the faux pas test. *Arch Gerontol Geriatr*. 2016;62:152–162. doi: 10.1016/j.archger.2015.09.009
8. Bernstein DM, Coolin A, Fischer AL, et al. False-belief reasoning from 3 to 92 years of age. *PLoS One*. 2017;12(9):e0185345.
doi: 10.1371/journal.pone.0185345

ОБ АВТОРАХ

* Лисичкина Алёна Алексеевна;

адрес: Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, д. 1;

ORCID: 0009-0000-8276-0940;

eLibrary SPIN: 1720-9044;

e-mail: liss_alyona@mail.ru

Никишина Вера Борисовна, д-р психол. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-2421-3652;

eLibrary SPIN: 6779-0519;

e-mail: nikishina_vb@rsmu.ru

Петраш Екатерина Анатольевна, д-р психол. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-3177-088X;

eLibrary SPIN: 2313-1089;

e-mail: petrash@mail.ru

Кучерявенко Игорь Анатольевич, канд. психол. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-0226-0389;

eLibrary SPIN: 9220-1544;

e-mail: kucheryavenko@bsuedu.ru

AUTHORS' INFO

* Alyona A. Lisichkina;

address: 1 Ostrovityanova st, Moscow, Russia, 117997;

ORCID: 0009-0000-8276-0940;

eLibrary SPIN: 1720-9044;

e-mail: liss_alyona@mail.ru

Vera B. Nikishina, Dr. Sci. (Psychology), Professor;

ORCID: 0000-0003-2421-3652;

eLibrary SPIN: 6779-0519;

e-mail: nikishina_vb@rsmu.ru

Ekaterina A. Petrash, Dr. Sci. (Psychology), Associate Professor;

ORCID: 0000-0002-3177-088X;

eLibrary SPIN: 2313-1089;

e-mail: petrash@mail.ru

Igor A. Kucheryavenko, Cand. Sci. (Psychology), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0002-0226-0389;

eLibrary SPIN: 9220-1544;

e-mail: kucheryavenko@bsuedu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author