



ISSN 2658-6843 (Print)
ISSN 2949-1436 (Online)

Том 7, № 2
ИЮНЬ 2025

**ФИЗИЧЕСКАЯ
И РЕАБИЛИТАЦИОННАЯ
МЕДИЦИНА,
МЕДИЦИНСКАЯ
РЕАБИЛИТАЦИЯ**

PHYSICAL AND REHABILITATION
MEDICINE, MEDICAL REHABILITATION

Официальное научное издание
специализированной медицинской прессы для врачей

Подписной индекс 71395

УЧРЕДИТЕЛИ

- ФГБНУ «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии»
- ООО «Эко-Вектор»
Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ № ФС77-74092 от 19.10.2018

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Эко-Вектор»

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

E-mail: info@eco-vector.com

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

РЕКЛАМА

Отдел рекламы

Тел.: +7 (968) 545 78 20

E-mail: adv2@eco-vector.com

РЕДАКЦИЯ

Зав. редакцией

Ульяна Григорьевна Пугачёва

E-mail: upugacheva@yandex.ru

Адрес: 107031, Москва,

ул. Петровка, д. 25, стр. 2

<https://journals.eco-vector.com/2658-6843>

ПОДПИСКА

Подписка на печатную версию
через интернет:

- www.journals.eco-vector.com
- www.akc.ru
- www.pressa-rf.ru

ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

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

ИНДЕКСАЦИЯ

- РИНЦ
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

Журнал включён в перечень
периодических изданий ВАК,
в которых рекомендована публикация
работ соискателей учёных степеней
кандидата и доктора наук

ОРИГИНАЛ-МАКЕТ

подготовлен в издательстве «Эко-Вектор».

Литературный редактор: *М.Н. Шошина*

Корректор: *М.Н. Шошина*

Вёрстка: *Е.А. Труханова*

Сдано в набор 19.06.2025.

Подписано в печать 25.06.2025.

Выход в свет 07.07.2025.

Формат 60 × 88%. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,5.

Цена свободная.

Тираж 500 экз. Заказ № 5-6657-1v.

Отпечатано в ООО «Типография Экспресс В2В»
191180, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки,
д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1.
Тел.: +7 (812) 646 33 77

16+

© ООО «Эко-Вектор», 2025

ISSN 2658-6843 (Print)

ISSN 2949-1436 (Online)

Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация

Том 7 | Выпуск 2 | 2025

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Иванова Галина Евгеньевна, д.м.н., профессор (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3180-5525

Первый заместитель главного редактора

Позин Сергей Никифорович, д.м.н., проф., академик РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-1811-6936

Заместители главного редактора по направлениям

Белкин А.А., д.м.н., проф. (Екатеринбург, Россия)

ORCID: 0000-0002-0544-1492

Прокопенко С.В., д.м.н., проф. (Красноярск, Россия)

ORCID: 0000-0002-4778-2586

Цыкунов М.Б., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-0994-8602

Мишина И.Е., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург, Россия)

ORCID: 0000-0002-7659-8008

Семиглазова Т.Ю., д.м.н., проф. (Санкт-Петербург, Россия)

ORCID: 0000-0002-4305-6691

Валиуллина С.А., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-1622-0169

Редакционная коллегия

Аронов Д. М., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-0484-9805

Батышева Т.Т., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-0928-2131

Бердникович Е.С., к.п.н., доц. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-7608-2255

Бойцов С.А., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-6998-8406

Бубнова М.Г., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-2250-5942

Буйлова Т.В., д.м.н., проф. (Нижегород, Россия)

ORCID: 0000-0003-0282-7207

Герасименко М.Ю., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-1741-7246

Гречко А.В., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3318-796X

Даминов В.Д., д.м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-7141-6052

Данилов А.Б., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-2958-4479

Дымочка М.А., д.м.н., доц. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-0617-5093

Zampolini Mauro, Professor, MD (Foligno, Perugia, Italy)

ORCID: 0000-0001-8089-8583

Зилов В.Г., д.м.н., проф., академик РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3908-6801

Кадыков А.С., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-7491-7215

Касаткин В.Н., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-1142-9796

Корчажкина Н.Б., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-6713-8778

Кузовлев А.Н., д.м.н., доц. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-5930-0118

Лебединский К.М., д.м.н., проф. (Россия, Санкт-Петербург)

ORCID: 0000-0002-5752-4812

Левин О.С., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3872-5923

Лайшева О.А., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-8084-1277

Мельникова Е.И., д.м.н., доцент (Россия, Санкт-Петербург)

ORCID: 0000-0002-2076-4062

Молчанов И.В., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-8520-9468

Никитин И.Г., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-1699-0881

Николаев Н.С., д.м.н., проф. (Россия, Чебоксары)

ORCID: 0000-0002-1560-470X

Олескин А.В., д.б.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-6816-1615

Перепелца С.А., д.м.н., проф. (Россия, Калининград)

ORCID: 0000-0002-4535-9805

Петриков С.С., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3292-8789

Петрова М.В., д.м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-4272-0957

Пирадов М.А., д.м.н., проф.,

академик РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-6338-0392

Поляев Б.А., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-9648-2336

Румянцева А.Г., д.м.н., проф., академик РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-1643-5960

Сарана А.М., к.м.н. (Россия, Санкт-Петербург)

ORCID: 0000-0002-3198-8990

Sobotka Lubos, Professor, MD (Hradec Kralove, Czech Republic)

ORCID: 0000-0001-0372-5790

Суворов А.Ю., к.м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-4901-2208

Супонева Н.А., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3956-6362

Weerkamp-Bartholomeus Paula, Professor, MD (Voerendaal, The Netherlands)

ORCID: 0000-0001-8904-5333

Хасанова Д.Р., д.м.н., проф. (Россия, Казань)

ORCID: 0000-0002-8825-2346

Хатькова С.Е., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-3071-4712

Чичановская Л.В., д.м.н., доц. (Россия, Тверь)

ORCID: 0000-0001-5956-2305

Шамалов Н.А., д.м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-6250-0762

Шакула А.В., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-9952-9630

Шестопалов А.Е., д.м.н., проф. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0002-5278-7058

Редакция не несет 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://journals.eco-vector.com/2658-6843>. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с письменного разрешения издателя — издательства «Эко-Вектор».

ЭКО • ВЕКТОР



FOUNDERS

- Federal Research and Clinical Center for Resuscitation and Rehabilitation
- Eco-Vector

PUBLISHER

Eco-Vector

Address: 3 liter A, 1H,
Aptekarsky pereulok, 191181,
Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: info@eco-vector.com
WEB: <https://eco-vector.com>

ADVERTISE

Adv. department

Phone: +7 (968) 545 78 20
E-mail: adv2@eco-vector.com

EDITORIAL OFFICE

Executive editor

Ulyana G. Pugacheva
E-mail: upugacheva@yandex.ru
Address: 25 bld 2, Petrovka street,
Moscow, 107031, Russian Federation
<https://journals.eco-vector.com/2658-6843>

SUBSCRIPTION

For print version:
www.journals.eco-vector.com

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

- Russian Science Citation Index
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

TYPESET

complete in Eco-Vector
Copyeditor: *M.N. Shoshina*
Proofreader: *M.N. Shoshina*
Layout editor: *E.A. Trukhtanova*

ISSN 2658-6843 (Print)

ISSN 2949-1436 (Online)

Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation

Volume 7 | Issue 2 | 2025

QUARTERLY PEER-REVIEW MEDICAL JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Galina E. Ivanova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)
ORCID: 0000-0003-3180-5525

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Sergey N. Puzin, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Academician of RAS (Moscow, Russia)
ORCID: 0000-0003-1811-6936

VICE EDITORS-IN-CHIEF

A.A. Belkin, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Ekaterinburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-0544-1492

S.V. Prokopenko, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Krasnoyarsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-4778-2586

M.B. Tsykunov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-0994-8602

I.E. Mishina, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Saint-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-7659-8008

T.Y. Semiglazova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Saint-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-4305-6691

S.A. Valiullina, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-1622-0169

EDITORIAL COUNCIL

D.M. Aronov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-0484-9805

T.T. Batsheva, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-0928-2131

E.S. Berdnikovich, Cand. Sci. (Psychol), Assistant Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-7608-2255

S.A. Boytsov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Corresponding Member of the RAS

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6998-8406

M.G. Bubnova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-2250-5942

T.V. Buylova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Nizhni Novgorod, Russia)

ORCID: 0000-0003-0282-7207

M.Y. Gerasimenko, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-1741-7246

A.V. Grechko, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Corresponding Member of the RAS

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3318-796X

V.D. Daminov, MD, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-7141-6052

A.B. Danilov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-2958-4479

M.A. Dymochka, MD, Assistant professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-0617-5093

Zampolini Mauro, MD, Professor (Foligno, Perugia, Italy)

ORCID: 0000-0001-8089-8583

V.G. Zilov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Academician of RAS (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3908-6801

A.S. Kadykov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-7491-7215

V.N. Kasatkin, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-1142-9796

N.B. Korchazhkina, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6913-8778

A.N. Kuzovlev, MD, Assistant professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-5930-0118

K.M. Lebedinskiy, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Saint-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-5752-4812

O.S. Levin, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3872-5923

O.A. Laysheva, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-8084-1277

E.I. Melnikova, MD, Assistant professor, Dr. Sci. (Med.)

(Saint-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0002-2076-4062

I.V. Molchanov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-8520-9468

I.G. Nikitin, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-1699-0881

N.S. Nikolaeв, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Cheboksary, Russia)

ORCID: 0000-0002-1560-470X

A.V. Oleskin, Professor, Dr. Sci. (Biol.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-6816-1615

S.A. Perepelitsa, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Kalininograd, Russia)

ORCID: 0000-0002-4535-9805

S.S. Petrikov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Corresponding Member of the RAS

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3292-8789

M.V. Petrova, MD, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-4272-0957

M.A. Piradov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Academician of RAS

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-6338-0392

B.A. Polyayev, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-9648-2336

A.G. Rumyantsev, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Academician of RAS

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-1643-5960

A.M. Sarana, MD, Cand. Sci. (Med.) (Saint-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0003-3198-8990

Sobotka Lubos, Professor, MD, PhD (Hradec Kralove, Czech Republic)

ORCID: 0000-0002-0372-5790

A.Y. Suvorov, MD, Cand. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-4901-2208

N.A. Suponeva, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.), Corresponding Member

of the RAS (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3956-6362

Weerkamp-Bartholomeus Paula, Professor, MD (Voerendaal, Netherlands)

ORCID: 0000-0001-8904-5333

D.R. Khasanova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Kazan, Russia)

ORCID: 0000-0002-8825-2346

S.E. Khatkova, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-3071-4712

L.V. Chichanovskaya, MD, Assistant professor, Dr. Sci. (Med.) (Tver, Russia)

ORCID: 0000-0001-5956-2305

N.A. Shamalov, MD, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6250-0762

A.V. Shakula, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-9952-9630

A.E. Shestopalov, MD, Professor, Dr. Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-5278-7058

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://journals.eco-vector.com/2658-6843/>. Full or partial reproduction of materials published in the journal is allowed only with the written permission of the publisher — the Eco-Vector publishing house.

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Е.М. Черных, Н.М. Хасанова, А.А. Карякин, З.Э. Джафарова, А.А. Клюкас*
Возможности машинного обучения в прогнозировании ранних функциональных исходов у пациентов с инсультом 82
- Т.Р. Каменева, С.А. Базанович, М.Ю. Юрьев, М.А. Жданова, М.А. Голубева, Е.В. Лугинина, М.В. Петрова*
Этиологическая структура возбудителей инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии, проходящих лечение и реабилитацию в отделениях реанимации и интенсивной терапии 95
- Д.В. Скворцов, А.Р. Худайгулова, С.Н. Кауркин, Н.В. Гребенкина, Г.Е. Иванова*
Тренировка с биологической обратной связью по амплитуде коленного сустава у больных ишемическим церебральным инсультом: пилотное исследование 109
- О.В. Попова, И.Н. Новосёлова, И.В. Понина, Е.А. Львова, С.В. Мещеряков, С.А. Валиуллина*
Лечение спастического синдрома в программе комплексной реабилитации детей с позвоночно-спинномозговой травмой. 125

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

- С.Г. Щербак, Д.А. Вологжанин, С.В. Макаренко, А.С. Голота, Т.А. Камилова*
Виртуальная реальность в медицинской реабилитации 134

КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

- А.А. Ильина, М.В. Петрова, А.В. Гречко, Д.В. Ильин, Г.К. Спирина*
Интервальная гипокси-гиперокситерапия как метод лечения пациентов в хроническом критическом состоянии, обусловленном тяжёлым повреждением головного мозга. 154

CONTENTS

ORIGINAL STUDY ARTICLES

- Ekaterina M. Chernykh, Nina M. Khasanova, Aleksey A. Karyakin, Zohra E. Dzhafarova, Alexey A. Kliukas*
Machine Learning for Predicting Early Functional Outcomes in Patients with Stroke 82
- Tatiana R. Kameneva, Sergey A. Bazanovich, Mikhail Yu. Yuriev, Maria A. Zhdanova, Marina A. Golubeva,
Elena V. Luginina, Marina V. Petrova*
Etiological Structure of Lower Respiratory Tract Pathogens in Treatment and Rehabilitation of Patients
with Chronic Critical Illness in Intensive Care Units 95
- Dmitry V. Skvortsov, Aliya R. Khudaigulova, Sergey N. Kaurkin, Natalya V. Grebenkina, Galina E. Ivanova*
Biofeedback Training for Knee Joint Range of Motion in Patients with Ischemic Cerebral Stroke: a Pilot Study 109
- Olga V. Popova, Irina N. Novoselova, Irina V. Ponina, Ekaterina A. Lvova, Semen V. Meshcheryakov,
Svetlana A. Valiullina*
Treatment of Spasticity as Part of Comprehensive Rehabilitation Program for Children
with Spinal Cord Injuries. 125

REVIEWS

- Sergey G. Scherbak, Dmitry A. Vologzhanin, Stanislav V. Makarenko, Aleksandr S. Golota, Tatyana A. Kamilova*
Virtual Reality in Medical Rehabilitation 134

CASE REPORTS

- Anna A. Ilina, Marina V. Petrova, Andrey V. Grechko, Dmitri V. Ilin, Galina K. Spirina*
Interval Hypoxia-Hyperoxia Therapy as a Method of Treating Patients with Chronic Critical Illness
Caused by Severe Brain Damage 154

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab678920>

EDN: JEMEVO

Возможности машинного обучения в прогнозировании ранних функциональных исходов у пациентов с инсультом

Е.М. Черных, Н.М. Хасанова, А.А. Карякин, З.Э. Джафарова, А.А. Ключас

Северный государственный медицинский университет, Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Задача создания универсального прогностического инструмента для пациентов с инсультом до конца не решена.

Цель исследования — на основе алгоритмов машинного обучения разработать модели, способные с первых суток от дебюта инсульта прогнозировать функциональный исход с оценкой по шкале инсульта Национального института здоровья США (NIHSS) и модифицированной шкале Рэнкина (mRS) при выписке из стационара на основании клинико-анамнестических предикторов.

Методы. На основе базы данных, созданной из 5225 записей о пациентах с инсультом, выписанных из неврологических отделений, разработаны модели на основе алгоритмов Artificial Neural Network (ANN) и Random Forest (RF). Использовали 21 переменную, включая демографические данные пациентов, исходные баллы по NIHSS и mRS, тип инсульта, время от начала заболевания до госпитализации, сведения о сопутствующих заболеваниях и выполненной экстренной реваскуляризации. Прогнозировали исходы с оценкой в баллах по шкалам NIHSS и mRS. Алгоритмы решали задачу классификации по множественному набору значений исхода: 26 классов для модели I (0–25 баллов по NIHSS) и 6 классов в для модели II (0–5 баллов по mRS). Качество моделей оценивали с помощью метода площади под кривой операционной характеристики приёмника (ROC-AUC). Вклад каждого предиктора в результат прогнозирования оценивали с помощью метода SHapley Additive exPlanations (SHAP).

Результаты. Определены результаты прогностической эффективности ANN по AUC-ROC: 0,771 для модели I и 0,844 для модели II. RF AUC-ROC составила 0,778 для модели I и 0,845 для модели II. Для дальнейшей работы выбран алгоритм RF ввиду его лучшей интерпретируемости. Наиболее значимыми признаками, влияющими на прогнозируемые исходы, стали исходные значения NIHSS и mRS, возраст пациента, время доезда до стационара от начала инсульта, тип инсульта. При проверке эффективности алгоритма RF на внешней валидационной выборке из 783 записей показатели ROC AUC составили 0,786 для модели I и 0,774 для модели II. Для практического применения создан калькулятор.

Заключение. Разработанные модели на основе алгоритма RF способны в течение первых суток от начала инсульта достоверно прогнозировать ранний функциональный исход с оценкой по NIHSS и mRS на основании клинико-анамнестических предикторов. Полученный инструмент полезен для формирования персонализированных терапевтических и реабилитационных стратегий в острый период инсульта. Универсальность использования моделей позволяет их применение в удалённых сельских медицинских учреждениях с дефицитом или отсутствием профильных специалистов и диагностического оборудования.

Ключевые слова: инсульт; прогнозирование; ранний функциональный исход; универсальная прогностическая модель; алгоритм Random Forest.

Как цитировать:

Черных Е.М., Хасанова Н.М., Карякин А.А., Джафарова З.Э., Ключас А.А. Возможности машинного обучения в прогнозировании ранних функциональных исходов у пациентов с инсультом // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 82–94. DOI: 10.36425/rehab678920 EDN: JEMEVO

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab678920>

EDN: JEMEVO

Machine Learning for Predicting Early Functional Outcomes in Patients with Stroke

Ekaterina M. Chernykh, Nina M. Khasanova, Aleksey A. Karyakin, Zohra E. Dzhafarova, Alexey A. Kliukas

Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Development of a universal predictive tool for patients with stroke remains a challenge.

AIM: The study aimed to develop machine learning–based models that could predict functional outcomes from the first day after stroke. The models were trained using clinical and anamnestic predictors, and functional outcomes were evaluated using the National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) and the modified Rankin Scale (mRS) at hospital discharge.

METHODS: Models based on artificial neural network (ANN) and random forest (RF) algorithms were developed using a database created from 5,225 records of patients with stroke discharged from neurological departments. Twenty-one parameters were used, including patient demographics; baseline National Institutes of NIHSS and mRS scores; stroke type; time from stroke onset to hospitalization; comorbidities; and emergency revascularization. Outcomes were predicted using NIHSS and mRS scores. The algorithms solved the classification problem for multiple sets of outcome values. Model I had 26 classes (NIHSS score of 0–25), while model II had 6 classes (mRS score of 0–5). The quality of the models was evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (ROC–AUC). The contribution of each predictor was evaluated using the SHapley Additive exPlanations (SHAP).

RESULTS: The predictive value of the ANN was determined based on the AUC–ROC: 0.771 for model I and 0.844 for model II. The RF AUC–ROC was 0.778 for model I and 0.845 for model II. The RF algorithm was chosen for further work due to its better interpretability. The most significant features that influenced the predicted outcomes were baseline NIHSS and mRS scores, patient age, time from stroke onset to admission, and stroke type. When RF performance was tested on an external validation set of 783 records, ROC–AUC values were 0.786 for model I and 0.774 for model II. A calculator was developed for practical use.

CONCLUSION: The proposed RF-based models can reliably predict an early functional outcome within the first day of stroke onset, using NIHSS and mRS scores and clinical and anamnestic predictors. This tool can be used to develop personalized therapeutic and rehabilitation strategies in the acute phase of a stroke. These models are versatile to be used in rural and remote healthcare organizations that lack specialized staff and diagnostic equipment.

Keywords: stroke; prognosis; early functional outcome; universal prognostic model; Random Forest algorithm.

To cite this article:

Chernykh EM, Khasanova NM, Karyakin AA, Dzhafarova ZE, Kliukas AA. Machine Learning for Predicting Early Functional Outcomes in Patients with Stroke. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):82–94. DOI: 10.36425/rehab678920 EDN: JEMEVO

Submitted: 26.04.2025

Accepted: 01.05.2025

Published online: 19.06.2025

Список сокращений

ANN (Artificial Neural Network) — вычислительная модель, вдохновлённая структурой и функциями биологических нейронных сетей

DT (Decision Trees) — деревья решений

mRS (Modified Rankin Scale) — модифицированная шкала Рэнкина для оценки степени инвалидности и зависимости в повседневной жизни лица, перенёвшего инсульт или другие неврологические нарушения

NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale) — шкала инсульта Национального института здоровья США для определения степени его тяжести

RBF (Radial Basis Function kernel) — ядро радиальной базисной функции

RF (Random Forest) — метод случайного леса; алгоритм машинного обучения, который состоит из множества отдельных независимых «решающих деревьев»

ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic — Area Under Curve) — метрика оценки качества модели машинного обучения

SHAP (SHapley Additive exPlanations) — метод интерпретации машинного обучения, объясняющий вклад каждого признака в предсказание конкретного наблюдения

SVC (Support Vector Classifier) — метод опорных векторов

ОБОСНОВАНИЕ

Инструменты на основе искусственного интеллекта и машинного обучения востребованы на современном этапе исследовательской и клинической медицинской деятельности. Они активно используются в системах принятия врачебных решений, диагностике и прогнозировании заболеваний, в том числе в неврологии, что ранее казалось невозможным [1, 2].

Обращает на себя внимание максимальное количество разработок и моделей с использованием машинного обучения для социально значимых неврологических заболеваний — эпилепсии, болезни Альцгеймера и инсульта [2].

Последнее десятилетие в неврологии инсульта стало революционным. Появилась возможность использования принципиально новых методов для диагностики и лечения, в том числе с применением функционала искусственного интеллекта. За этот период методы машинного обучения использовали у пациентов с инсультом для диагностики, прогнозирования начальных признаков инсульта, оценки тяжести состояния, определения состава тромба при ишемическом инсульте, анализа отёка головного мозга, прогнозирования увеличения гематомы при геморрагическом инсульте и прогнозирования исхода заболевания [1, 3].

Внедрение алгоритмов машинного обучения в клиническую практику предполагает четыре этапа рабочего процесса: мероприятия на этапе первичной профилактики; лечение в остром периоде; прогнозирование исходов после постановки диагноза и вторичную профилактику. Первичная профилактика включает в себя персонализированное или стратифицированное прогнозирование рисков для пациентов и выявление проблем в оказании медицинской помощи, а интеграция искусственного интеллекта в лечение в острый период направлена на помощь врачам в постановке диагноза и принятии тактических решений [4].

Алгоритмы машинного обучения для прогнозирования при установленном диагнозе острого цереброваскулярного заболевания и алгоритмы вторичной профилактики демонстрируют прогнозируемые результаты, выявляющие пациентов, которые будут по-разному восстанавливаться в ходе лечения или, возможно, потребуют более тщательного наблюдения либо дополнительных лечебных мероприятий из-за повышенного риска рецидива. В совокупности алгоритмы машинного обучения должны помогать в принятии клинических решений на каждом этапе, предоставляя рекомендации и указывая на возможные упущения, проигнорированные при рутинном обследовании [5].

Прогнозирование клинических и функциональных исходов у пациентов с острым инсультом обычно основывается на многофакторной информации, такой как демографические, клинические, лабораторные и радиологические данные [6].

Модели прогнозирования на основе искусственного интеллекта могут давать объективные результаты после изучения входных данных и выполнения многочисленных расчётов. Прогностические модели машинного обучения, основанные на распознавании и сегментации признаков изображений, значительно упростили быструю диагностику инсульта, но прогноз исхода инсульта зависит также от множества других клинических и анамнестических факторов [7]. Стратегии прогнозирования исхода инсульта с использованием искусственного интеллекта подразумевают поиск оптимального набора входных предикторов для выполнения наиболее точного и достоверного прогноза, а также выбор алгоритма с наиболее сбалансированным сочетанием точности, интерпретируемости и простоты использования модели. По данным разных авторов, ключевыми предикторами для прогнозирования исходов инсульта являются возраст пациента, исходная тяжесть

неврологического дефицита, индивидуальный преморбидный фон, биохимические показатели, а также данные нейровизуализационных исследований [8–10], причём включение нескольких типов данных в одну модель искусственного интеллекта повышает производительность модели и улучшает точность прогнозирования [11].

Среди всего разнообразия алгоритмов наиболее эффективными в прогнозировании функциональных исходов инсульта зарекомендовали себя деревья решений (Decision Trees, DT) и метод случайного леса (Random Forest, RF), градиентный бустинг (Extreme Gradient Boosting, XGB), метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) и искусственные нейронные сети (Artificial Neural Network, ANN) с максимальным достижением точности 95,5% в случае AdaBoost [7, 12, 13]. Предпочтение применения того или иного алгоритма зависит от специфики исходных данных и цели исследования, при этом ни один алгоритм не является абсолютно точным, а результаты варьируют в зависимости от используемых данных и методологии. И хотя разработки последних лет демонстрируют преимущество алгоритмов машинного обучения, в частности глубоких нейронных сетей (Deep Neural Networks, DNN), перед традиционными методами в прогнозировании долгосрочных результатов у пациентов с ишемическим инсультом, эффективность моделей машинного обучения по сравнению с регрессионными моделями, по данным разных исследователей, неоднозначна [12, 14]. Таким образом, создание надёжного прогностического инструмента для пациентов с инсультом остаётся сложной и не решённой до конца задачей.

Цель исследования — на основе алгоритмов машинного обучения разработать, обучить и апробировать модели, способные с первых суток от дебюта инсульта прогнозировать функциональный исход с оценкой по шкале инсульта Национального института здоровья США (National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS) и модифицированной шкале Рэнкина (modified Rankin scale, mRs) при выписке из стационара на основании клинико-анамнестических предикторов.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Выполнено историческое когортное исследование, проведённое среди пациентов с острым инсультом, выписанных из неврологических отделений Регионального сосудистого центра (РСЦ) ГБУЗ Архангельской области «Архангельская областная клиническая больница» (РСЦ АОКБ) и РСЦ ГБУЗ Архангельской области «Первая городская клиническая больница имени Е.Е. Волосевич» (РСЦ 1 ГКБ) в период с 1 января 2017 года по 31 декабря 2020 года.

Критерии соответствия

Критерии включения: все пациенты с инсультом, выписанные из РСЦ АОКБ и РСЦ 1 ГКБ с января 2017 по декабрь 2020 года.

Критерии исключения: пациенты с диагнозом аневризматической болезни головного мозга; субарахноидальное кровоизлияние; пациенты, в первичной документации которых отсутствовала оценка по NIHSS и mRs.

Условия проведения

Все пациенты, включённые в исследование, находились на лечении в РСЦ АОКБ и РСЦ 1 ГКБ.

Продолжительность исследования

Все пациенты были госпитализированы в РСЦ АОКБ и РСЦ 1 ГКБ в период с января 2017 года по декабрь 2020 года.

Описание медицинского вмешательства

Все пациенты получали стандартную терапию, соответствующую клиническим рекомендациям; реперфузионные методики применялись только у пациентов РСЦ 1 ГКБ; реабилитационные мероприятия осуществлялись силами специалистов мультидисциплинарной бригады. Дополнительных медицинских вмешательств медикаментозной и немедикаментозной природы в процессе исследования не проводилось.

Построение моделей машинного обучения

Предварительная обработка данных. Для обеспечения целостности и единообразия набора данных текстовое содержимое клинических документов было предварительно обработано, и на их основе создана компьютерная база данных с возможностью проведения статистического анализа, который проводился с использованием пакетов Microsoft Excel 2010 (США), Stata версии 18 (Stata Corp., США).

Выбор предикторов. Для разработки моделей машинного обучения изначально из базы данных была извлечена 21 переменная, включая демографические данные пациентов, исходные баллы по NIHSS и mRS, подтипы инсульта в соответствии с классификационной системой Trial of ORG 10472 in Acute Stroke Treatment (TOAST), время от начала заболевания до госпитализации, сведения о сопутствующих заболеваниях (табл. 1). Для отбора признаков использовались четыре специализированных метода (SelectKBest, SelectPercentile, Logistic Regression, Random Forest), а их эффективность оценивалась с помощью классификатора SVC с RBF-ядром. Важность финальных предикторов определена независимым методом SHAP, выявляющим вклад каждого признака в прогноз.

Определение цели прогнозирования. Целью прогнозирования являлось определение наиболее вероятного балла по шкалам NIHSS и mRs к моменту выписки пациента из РСЦ. Ввиду различия оценочных шкал по характеристикам функционального состояния разрабатывали две модели для прогнозирования исхода по каждой шкале с оценкой в баллах (модель I для NIHSS, модель II для mRs).

Таблица 1. Характеристики и количественная оценка переменных, используемых для разработки моделей машинного обучения**Table 1.** Characteristics and quantification of parameters used to develop machine learning models

Переменная	Характеристика	Кодировка	Метрика
1	Возраст (возрастные группы), лет	age	<ul style="list-style-type: none"> • младше 20 • 20–29 • 30–39 • 40–44 • 45–49 • 50–59 • 60–69 • 70–74 • 75–79 • 80–89 • 90 и старше
2	Пол	gender	мужчины/женщины
3	mRs при поступлении	rank_adm	балл
4	NIHSS при поступлении	nihss_adm	балл
5	Тип инсульта	stroke	<ul style="list-style-type: none"> • атеротромботический • кардиоэмболический • криптогенный • лакунарный • внутримозговое кровоизлияние • венозный инсульт • другой уточнённой этиологии
6	Время от начала заболевания до госпитализации	time	<ul style="list-style-type: none"> • до 6 ч • 6–24 ч • более 24 ч
7	Проведение мероприятий экстренной реваскуляризации головного мозга	revasc	да/нет
<i>Наличие сопутствующих заболеваний</i>			
8	артериальная гипертензия	hyper	да/нет
9	сахарный диабет	diabet	да/нет
10	фибрилляция предсердий	atrialf	да/нет
11	церебральный атеросклероз	cerebr	да/нет
12	ишемическая болезнь сердца	cardiac	да/нет
13	хроническая сердечная недостаточность	heartf	да/нет
14	ожирение	obes	да/нет
15	острый инфаркт миокарда в анамнезе (постинфарктный кардиосклероз)	pics	да/нет
16	стенокардия	angina	да/нет
17	хроническая болезнь почек	kidney	да/нет
18	онкозаболевание	onco	да/нет
19	количество сопутствующих заболеваний	quantity	абс.
20	mRs при выписке	rank_dis	балл
21	NIHSS при выписке	nihss_dis	балл

Примечание. mRS — модифицированная шкала Рэнкина; NIHSS — шкала инсульта Национального института здоровья США.

Note. mRS, Modified Rankin Scale; NIHSS, National Institutes of Health Stroke Scale.

Построение моделей прогнозирования. Были использованы два алгоритма машинного обучения — ANN и RF. ANN состоит из слоёв взаимосвязанных искусственных нейронов. Искусственный нейрон создан по образу

биологического нейрона, получает несколько входных данных, умноженных на весовые коэффициенты, и выдаёт сумму входных данных. Алгоритм RF — ансамблевый метод, состоящий из множества деревьев решений (DT),

включающих несколько условий, которые могут быть истинными или ложными, с использованием входных переменных. Для окончательной классификации используется сумма решений, принятых алгоритмом деревьев решений (DT), что повышает точность прогнозирования и уменьшает вероятность переобучения [15].

Модели машинного обучения были обучены с использованием отобранных ранее переменных в качестве входных данных для классификации пациентов с разными вариантами функциональных исходов при выписке. Для ANN использовали четыре скрытых слоя, для алгоритма RF — 500 деревьев решений (для каждой модели).

Вклад каждого предиктора в результат прогнозирования оценивали с помощью метода аддитивных объяснений Шепли (SHapley Additive exPlanations, SHAP) [16].

Анализ данных и построение моделей проводили с помощью языка программирования Python с открытым исходным кодом.

Обучение осуществлялось на стационарном компьютере со следующими техническими характеристиками: видеокарта Nvidia GeForce GTX 4090 (24 Gb видеопамяти), процессор Intel I3500 (8 ядер, 32 потока, базовая частота 3,6 GHz), оперативная память DDR4 (128 Gb памяти с частотой 3200 MHz).

Оценка моделей прогнозирования. Качество моделей оценивали с помощью метода площади под кривой операционной характеристики приёмника (Receiver Operating Characteristic – Area Under Curve, ROC-AUC).

Исходы исследования

Основной исход исследования: оценка достижения пациентом с инсультом определённого функционального состояния, оценённого в баллах по шкалам NIHSS и mRs, к моменту выписки из РСЦ.

Методы регистрации исходов

Информацию об исходах извлекали из историй болезни и базы данных выписных эпикризов.

Статистический анализ

Размер выборки предварительно не рассчитывался.

Предварительно были выполнены описательные статистики. Категориальные переменные представлены как абсолютные значения и процентные доли. Числовые характеристики записывали в виде среднего арифметического (среднее значение балла по NIHSS) и показателя медианы (Me для баллов по mRs). Проверка законов распределения значений количественных показателей выполнялась с использованием статистического критерия Колмогорова–Смирнова. Детальное описание статистического анализа представлено в предыдущей публикации [17]. Математический и статистический анализ результатов проводился с использованием пакетов Microsoft Excel 2010 (США) и Stata версии 18 (Stata Corp., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В исследование были включены 5227 человек в возрасте от 18 до 98 лет в острый период инсульта: 3588 пациентов РСЦ 1 ГКБ и 1639 пациентов РСЦ АОКБ. После предварительной обработки данных количество записей для построения прогностической модели составило 5225. Записи изучаемой когорты после предварительной проверки и очистки были разделены случайным образом на две выборки: 4180 (80%) записей были определены в набор для обучения и кросс-валидации, остальные 1045 (20%) использовались в качестве набора для тестирования с целью оценки производительности обученных моделей.

Основные результаты исследования

Выбор предикторов. Выделенная из базы данных исходная 21 переменная была обработана пятью инструментами для отбора признаков в задачах машинного обучения (selectkbest, selectpercentile, logisticregression, RF и SVC с ядром RBF).

Наиболее эффективным алгоритмом для решения данной задачи оказался SVC с ядром RBF и предварительно удалёнными высококоррелированными признаками (средняя AUC 0,827 для модели I, средняя AUC 0,849 для модели II). Из дальнейших расчётов были удалены переменные atrialf, cardiac, heartf в связи с выявленной высокой корреляцией между категориальными признаками и целевыми переменными (балл по NIHSS и mRs при выписке).

В итоге для модели I (nihss_dis) были отобраны 11 признаков: «revasc», «time», «gender», «age», «stroke», «diabet», «pics», «kidney», «quantity», «nihss_adm», «rank_adm». Наиболее значимыми предикторами (в порядке убывания) стали «nihss_adm», «age», «time», «quantity», «stroke» (рис. 1).

Для модели II (rank_dis) были отобраны 12 признаков: «time», «gender», «age», «stroke», «hyper», «diabet», «pics», «angina», «kidney», «quantity», «nihss_adm», «rank_adm». Наиболее значимыми предикторами (в порядке убывания) стали «nihss_adm», «rank_adm», «time», «stroke», «age» (рис. 2).

Построение и обучение моделей прогнозирования

Для выполнения прогноза были выбраны алгоритмы ANN и RF для двух моделей с исходами nihss_dis и rank_dis. Подбор оптимальных параметров для построения выполняли по сетке.

Оба алгоритма решали задачу классификации по множественному набору значений исхода (26 классов для модели I, соответствующие баллам по NIHSS от 0 до 25, и 6 классов для модели II, соответствующие баллам по mRs от 0 до 5).

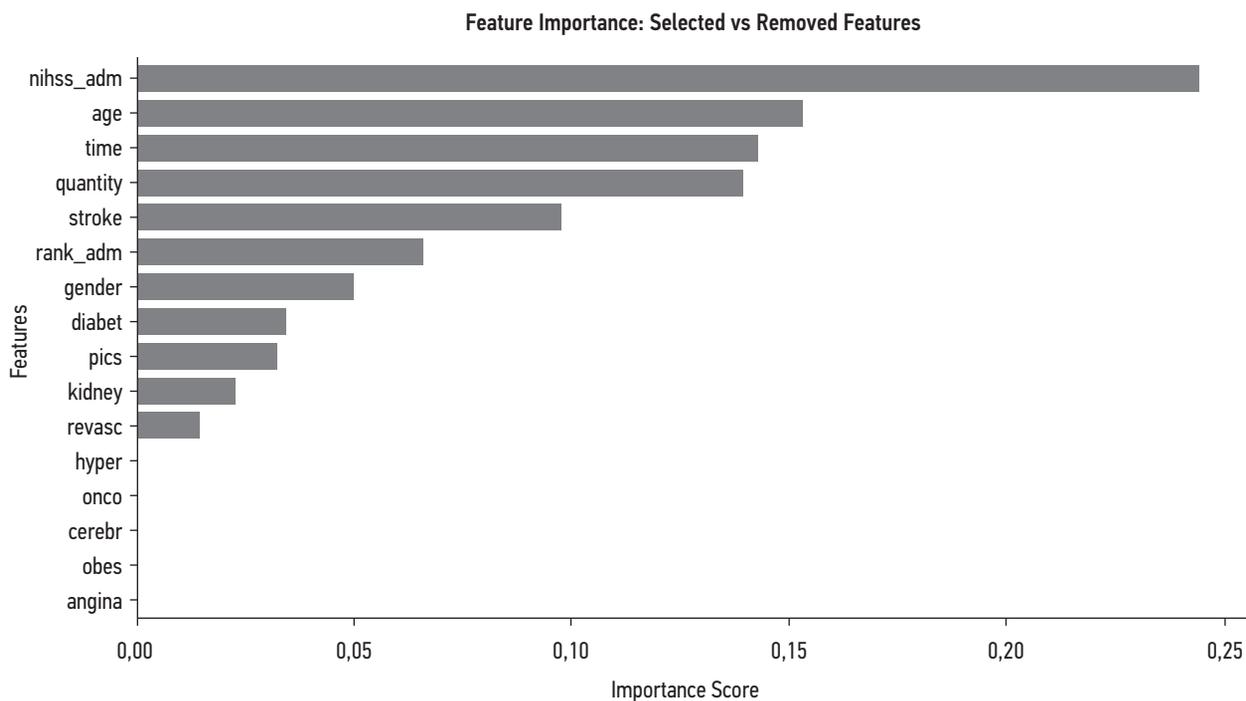


Рис. 1. Отобранные признаки для прогнозирования исхода nihss_dis.

Fig. 1. Features selected to predict nihss_dis.

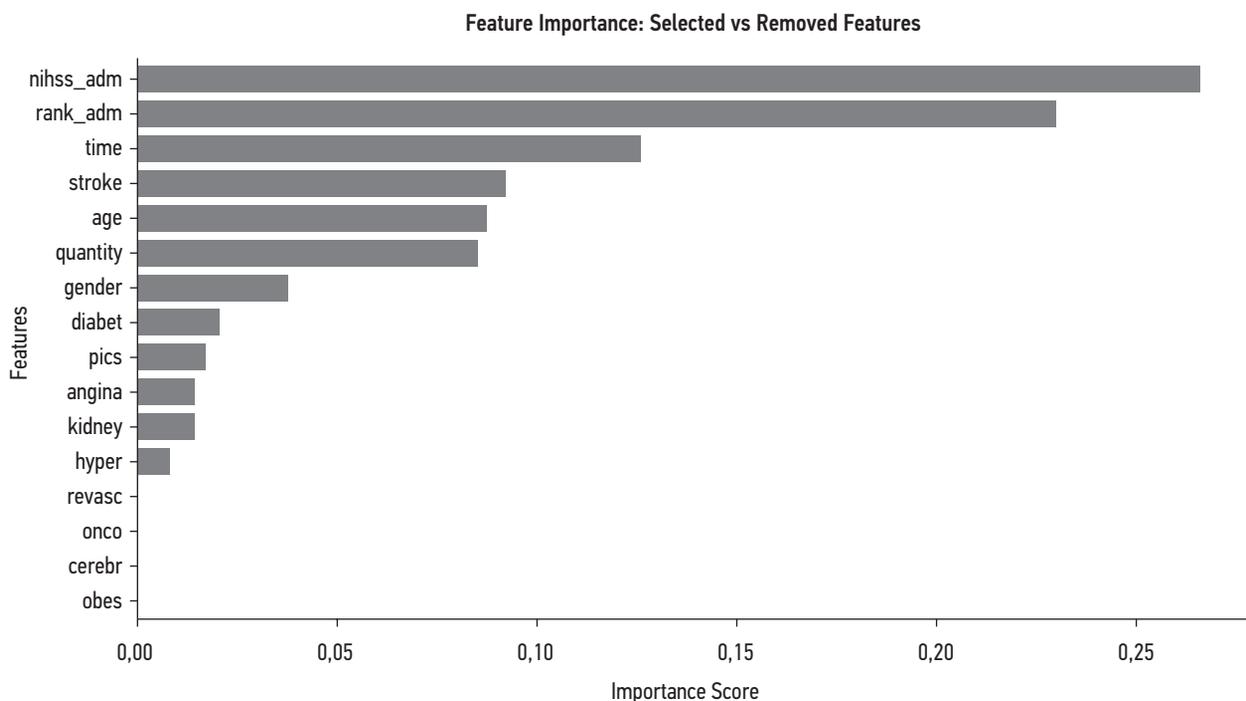


Рис. 2. Отобранные признаки для прогнозирования исхода rank_dis.

Fig. 2. Features selected to predict rank_dis.

Архитектура разрабатываемой ANN соответствовала многослойному перцептрону. Входной слой для каждой модели включал 11 нейронов для модели I и 12 нейронов для модели II, соответствующих количеству выделенных

предикторов. Четыре промежуточных слоя ANN содержали от 1024 до 64 нейронов. Выходной слой для каждой модели представлял собой один нейрон. После обучения построенных моделей получены результаты эффективности

по AUC-ROC: 0,771 для модели I и 0,844 для модели II. Процесс обучения ANN занял 68 минут. Показатели эффективности каждого алгоритма для моделей I и II в выборке для обучения представлены в табл. 2.

При формировании RF использовался обучающий набор с 11 и 12 ранее отобранными признаками для моделей I и II соответственно с построением 500 деревьев решений (DT) для каждой модели. Процесс обучения RF занял 12 минут.

Для дальнейшей работы было решено выбрать алгоритм RF ввиду его лучшей интерпретируемости

и сравниваемых показателей эффективности относительно ANN.

Для проверки прогностической эффективности алгоритма RF был использован внешний набор записей 783 пациентов с инсультом, проходившими лечение в РСЦ 1 ГКБ с 01.01.2022 по 31.12.2022. Показатели ROC-AUC при обработке алгоритма RF на валидационной выборке составили 0,786 для модели I и 0,774 для модели II (рис. 3, 4).

С целью определения вклада каждого фактора в принятие решений моделью использовали метод

Таблица 2. Показатели прогностической эффективности алгоритмов ANN и RF для моделей I и II

Table 2. Predictive performance parameters of ANN and RF algorithms for models I and II

Модель	Алгоритм, ROC-AUC	
	ANN	RF
I (для исхода nihss_dis)	0,771	0,778
II (для исхода rank_dis)	0,844	0,845

Примечание. ROC-AUC — метрика оценки качества модели машинного обучения; ANN — вычислительная модель, вдохновлённая структурой и функциями биологических нейронных сетей; RF — метод случайного леса.

Note. ROC-AUC, metric used to evaluate the quality of a machine learning model. ANN, computational model inspired by the structure and function of biological neural networks. RF, random forest method.

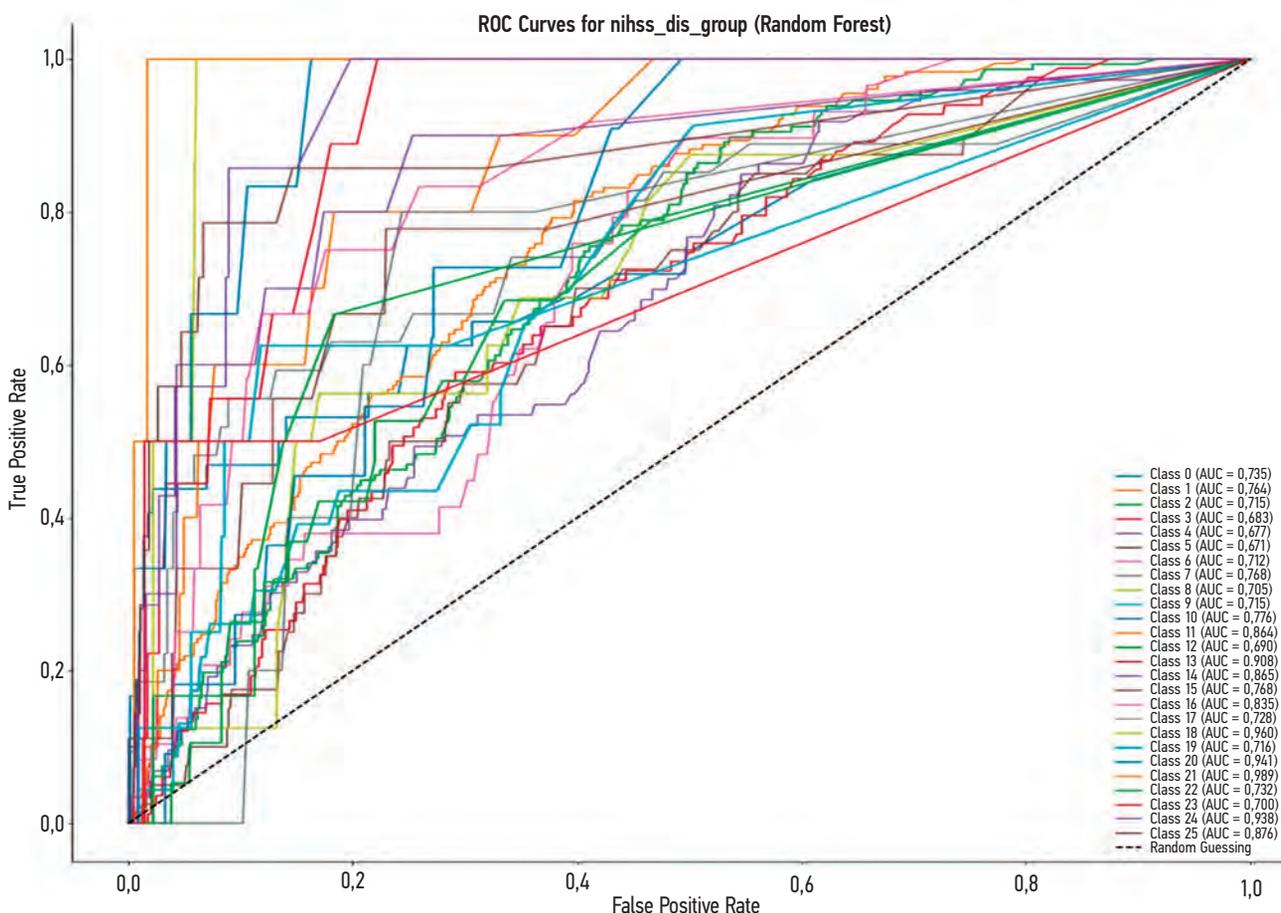


Рис. 3. ROC-AUC алгоритма RF для модели I на валидационной выборке. ROC-AUC — метрика оценки качества модели машинного обучения; RF — метод случайного леса.

Fig. 3. ROC-AUC of RF for model I on the validation set. ROC-AUC, metric used to evaluate the performance of a machine learning model. RF, random forest.

SHAP. Наиболее важными переменными в модели I были «nihss_adm», «rank_adm», «time», «age», «stroke» (в порядке убывания) (рис. 5). Наиболее значимыми признаками, влияющими на прогнозируемый исход в модели II, стали «rank_adm», «nihss_adm», «age», «time», «stroke» (в порядке убывания) (рис. 6). Среди факторов, отражающих наличие сопутствующих заболеваний, для обеих моделей наиболее значимый вклад внёс сахарный диабет (см. рис. 5, 6).

Для практического применения на основании разработанных моделей был создан калькулятор с возможностью использования в формате одностраничного сайта. На примере пациента из валидационной выборки продемонстрирована возможность реализации программы в клинической практике в виде online-калькулятора (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

В результате выполненной работы разработаны и обучены модели на основе алгоритмов RF и ANN, способные с первых суток от начала инсульта прогнозировать функциональный исход с оценкой по NIHSS и mRS при выписке из стационара на основании клинико-анамнестических предикторов. Модели, обученные на основе алгоритма RF, апробированы путём внешней валидации, результаты разработанных моделей включены в структуру калькулятора для выполнения прогноза.

Обсуждение основного результата исследования

Точность прогнозирования функционального восстановления после инсульта важна для проведения своевременных и целенаправленных мероприятий, улучшения

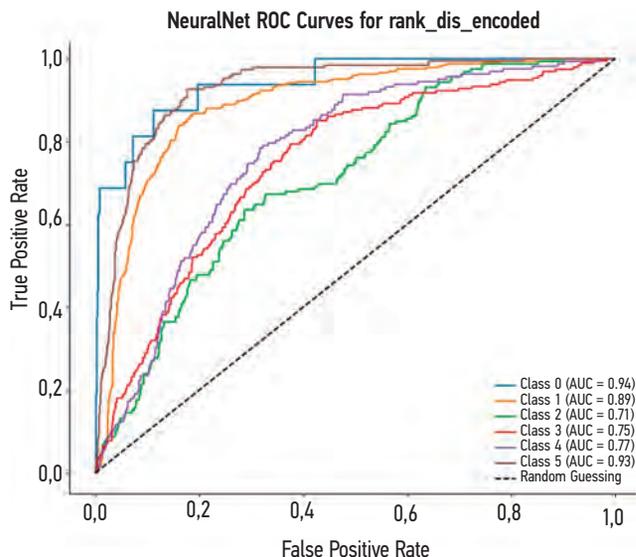


Рис. 4. ROC-AUC алгоритма RF для модели II на валидационной выборке. ROC-AUC — метрика оценки качества модели машинного обучения; RF — метод случайного леса.

Fig. 4. ROC-AUC of RF for model II on the validation set. ROC-AUC, metric used to evaluate the performance of a machine learning model. RF, random forest.

восстановления, распределения ресурсов, а также снижения экономических последствий постинсультной инвалидности [18]. И хотя прогностическая модель как объективный инструмент для принятия решений должна служить оптимизации реабилитационного процесса у пациентов с инсультом и снижению неопределённости в отношении прогнозируемых функций, отношение специалистов к возможностям выполнения такого прогноза неоднозначно. Исследование С. Кіæг и соавт., выполненное в 2018 году [19], показало, что только 35% специалистов

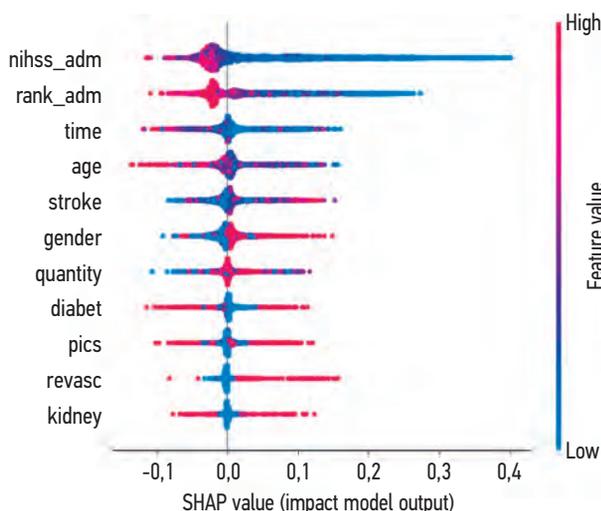


Рис. 5. Важность выбранных переменных для прогнозирования для модели I с исходом nihss_dis.

Fig. 5. Value of parameters selected to predict nihss_dis for model I.

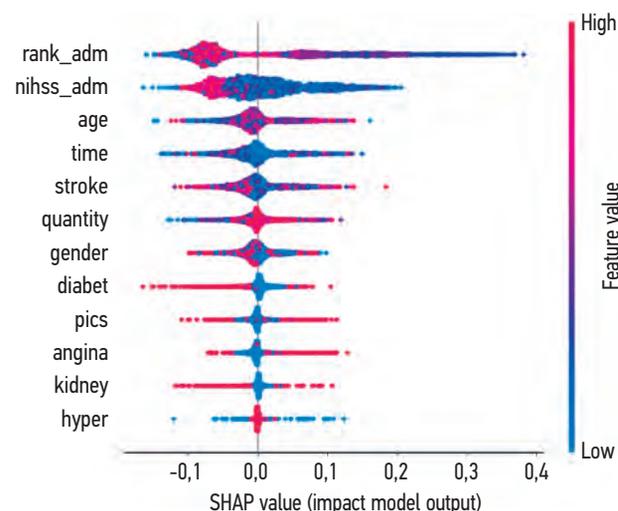


Рис. 6. Важность выбранных переменных для прогнозирования для модели II с исходом rank_dis.

Fig. 6. Value of parameters selected to predict rank_dis for model II.

Введите данные для прогнозирования исхода по шкалам National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) и modified Rankin scale (mRS)

Время доезда от дебюта инсульта: 6-24 часа

Пол пациента: Мужской

Возраст пациента: 50-59 лет

Тип инсульта: Криптогенный

NIHSS при поступлении (балл): 9

mRS при поступлении (балл): 3

Артериальная гипертензия: НЕТ ДА

Сахарный диабет: НЕТ ДА

ОИМ в анамнезе (ТРИС): НЕТ ДА

Стенокардия: НЕТ ДА

ХБП: НЕТ ДА

Были ли проведены мероприятия экстренной реваascularизации головного мозга?: НЕТ ДА

Прогнозировать исход

Наиболее вероятный балл по mRS: 3 Наиболее вероятный балл по NIHSS: 1

Рис. 7. Пример использования калькулятора для прогнозирования раннего функционального исхода инсульта.

Fig. 7. An example of using a calculator to predict an early functional outcome of stroke.

по трудотерапии и физиотерапевтов были осведомлены о моделях прогнозирования, и только 9% использовали модели прогнозирования в своей клинической практике.

Вопрос клинического применения прогностических моделей наиболее значимо встаёт в условиях удалённости медицинского учреждения, оказывающего помощь пациентам с инсультом, дефицита профильных специалистов и диагностического оборудования, с которыми сталкиваются сельские больницы. Помимо того, что сельские пациенты с инсультом по сравнению с городскими реже получают тромболитическую терапию и имеют более высокий уровень смертности, они также находятся в менее выигрышной ситуации по возможностям лечения, наблюдения и реабилитации в постстационарный период [20, 21].

Активное внедрение телемедицинских технологий позволяет улучшать эту ситуацию, при этом выявляется необходимость получения простого и универсального прогностического инструмента, который позволит даже в отсутствие профильного специалиста спрогнозировать ранний функциональный исход у пациента с инсультом и принять решение о реабилитационной маршрутизации, спланировать транспортировку в реабилитационное отделение или использовать возможности телереабилитации на месте [22].

В исследованиях последних лет подчёркивается важность использования как клинических, так и нейровизуализационных данных для создания оптимальной модели прогнозирования исходов инсульта, так как интеграция данных об очаге поражения и других радиомических характеристик может значительно увеличивать точность прогнозов [6, 23]. Так, наиболее точным краткосрочным

прогностическим инструментом для пациентов с инсультом, получающих системную тромболитическую терапию в сельской местности, определена шкала для прогнозирования функционального исхода через 3 месяца у пациентов с инсультом MRI-DRAGON (Magnetic Resonance Imaging-DRAGON) [24]. Однако применение моделей с включением в качестве прогностических факторов данных нейровизуализации в сельских больницах часто ограничивается возможностью выполнения только скрининговой компьютерной томографии головного мозга. Именно поэтому важной характеристикой оптимальной прогностической модели является её универсальность с возможностью использования не только в специализированных сосудистых центрах, но и в условиях ограниченности ресурсов.

Традиционный подход к прогнозированию исходов инсульта предполагает использование классических статистических моделей, в частности логистической регрессии. Модели логистической регрессии выявляют и подтверждают прогностические переменные, их главное преимущество заключается в лёгкости реализации и интерпретации. Однако в последнее десятилетие предпринимались неоднократные попытки разработки и введения в клиническую практику алгоритмов машинного обучения, способных учитывать нелинейные и сложные взаимодействия между несколькими прогностическими переменными. Так, по результатам систематического обзора методов прогнозирования исходов инсульта на основе структурированных данных (с исключением анализа изображений и текста), W. Wang и соавт. [12] продемонстрировали, что в шести исследованиях модели машинного обучения превосходили сравниваемые регрессионные модели, а в пяти исследованиях существенной разницы между статистическими и моделями машинного обучения не обнаружено. Данные исследований групп S.A. Alaka [25] и J. Neo [26] также показали, что алгоритмы логистической регрессии и машинного обучения обладают сопоставимой точностью прогнозирования. А в работе G. Çelik и соавт. [27] при прогнозировании 10-дневной смертности пациентов с инсультом получены результаты, свидетельствующие о том, что логистическая регрессия уступала ANN в показателях точности на этапе обучения, но превосходила ANN на этапе тестирования.

При выборе оптимального алгоритма для решения задачи прогнозирования необходимо сравнивать показатели эффективности не только с классическими статистическими методами, но и с показателями других алгоритмов машинного обучения. Ранее выполненные исследования демонстрируют лучшую сравнительную эффективность в прогнозировании исхода инсульта на структурированных данных SVC в трёх исследованиях, ANN — в двух исследованиях, RF — в двух исследованиях, алгоритма логистической регрессии — в двух исследованиях [12]. Нами были обучены алгоритмы RF и ANN для прогнозирования ранних функциональных исходов у пациентов с инсультом по двум вариантам: с оценкой по NIHSS

и mRs. Оба алгоритма после выполнения внутренней валидации продемонстрировали сравнимые показатели прогностической эффективности в отношении обоих исходов: хорошей для модели I и очень хорошей для модели II (см. табл. 2). Полученные нами результаты показали более значимую прогностическую ценность алгоритма RF в сравнении с аналогичными моделями, прогнозирующими исход с оценкой mRs, в работе S.A. Alaka и соавт. (ROC-AUC 0,63, 0,67 и 0,70) [25]. Схожие с нашими показатели эффективности для моделей с исходом по mRS были получены в работе J. Neo, где ROC-AUC для ANN составила 0,888, а для RF — 0,857 [26]. В изученной литературе нами не обнаружено сведений для сравнения эффективности моделей машинного обучения по прогнозированию исхода с оценкой результата по NIHSS. Сравнение эффективности классификаторов RF и ANN было найдено в публикации N.F. Zahidi и соавт., где, прогнозируя состояние здоровья на основе данных о жизненно важных показателях, авторы выявили большую точность алгоритма RF относительно ANN [28].

Для дальнейшей работы по созданию прогностической модели нами было принято решение выбрать один алгоритм, которым стал RF. В пользу выбранного алгоритма сыграло затраченное на него время обучения и интерпретируемость модели. Так, для обучения RF, который использует способы для снижения риска переобучения и требуемого времени обучения, потребовалось 12 минут в сравнении с 68 минутами для ANN.

Клиническому применению моделей машинного обучения препятствует проблема интерпретируемости, связанная с «чёрным ящиком», который скрывает методы работы алгоритма от пользователя, и практикующим врачам сложно доверять прогнозам модели и учитывать их при принятии решений. Ансамблевые методы, к которым относится RF, в целом обеспечивают лучшую интерпретируемость по сравнению с ANN, поскольку они позволяют количественно оценить важность признаков и создают более прозрачные прогнозы [29]. В нашем исследовании для интерпретации разработанных моделей использовался метод SHAP. С помощью диаграммы `shap.plots.beeswarm` проиллюстрировано влияние каждого признака на прогнозируемый исход (см. рис. 5, 6). Важность вклада каждого фактора представлена в порядке убывания (сверху вниз), а цветовое решение указывает на зависимость исхода от большего (красный цвет) или меньшего показателя признака (синий цвет). С одной стороны, это демонстрирует значимость вклада выделенных факторов в результат прогноза, с другой — свидетельствует об интерпретируемости модели, которая выводит признаки, в большей степени влияющие на исход, коррелирующие с теми, которые были получены на стадии отбора (см. рис. 1, 2).

Наиболее важными переменными, с учётом двух проанализированных моделей, стали возраст пациента, а также исходные показатели по шкалам NIHSS и mRs,

отражающие тяжесть инсульта на момент госпитализации (см. рис. 5, 6). Эти данные подтверждаются результатами ранее проведённых исследований, например, S.A. Alaka и соавт. [25], прогнозировавшими функциональные исходы у пациентов с инсультом на 90-й день от начала заболевания. Обе наши модели продемонстрировали прогностическое значение такого фактора, как время, прошедшее от момента дебюта инсульта до поступления в специализированный неврологический стационар, при том что фактор проведения экстренных реваскуляризационных методик имел меньшее значение в модели I с исходом по NIHSS (см. рис. 5) и не учитывался в модели II с исходом по mRs (см. рис. 6). Из сопутствующей патологии наиболее значимым фактором, влияющим на исход, оказался сахарный диабет, хотя, по данным литературных источников, большее прогностическое значение имеет не само наличие сахарного диабета в анамнезе, а уровень глюкозы крови в острейший период [25].

Внешняя проверка — валидация (оценка точности прогнозов на данных из другого источника, которые использовались для разработки модели) — важна для оценки применимости модели в условиях, отличных от условий обучающей и тестирующей выборки [26]. Это неотъемлемая часть внедрения модели в рутинную клиническую практику, позволяющая оценить применимость прогнозов к новым данным. В нашем исследовании модель I, прогнозирующая исход по NIHSS, показала схожие результаты на обучающем (0,778) и валидационном (0,786) наборах данных (см. табл. 2 и рис. 4). Модель II, прогнозирующая исход по mRs, на валидационном наборе продемонстрировала меньшую эффективность (0,774), чем на обучающей выборке (0,845), что может указывать на наличие признаков переобучения.

В перспективе возможно улучшение прогностических характеристик моделей при условии их интеграции в систему электронной истории болезни и амбулаторной карты пациента и добавления характеристик, доступных в более поздние периоды времени.

Ограничения исследования

Данное исследование ограничено его ретроспективным характером, а также необходимостью валидации моделей на данных из других лечебных учреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные нами модели на основе алгоритма RF способны в течение первых 24 часов от начала инсульта достоверно прогнозировать ранний функциональный исход с оценкой по NIHSS и mRs на основании клинико-анамнестических предикторов. Полученный инструмент полезен для формирования персонализированных терапевтических и реабилитационных стратегий в острый период инсульта, определения реабилитационного

маршрута и проведения прогностических бесед с пациентами и их родственниками. Универсальность и простота использования моделей определяет их ценность и позволяет применение в удалённо расположенных сельских медицинских учреждениях с дефицитом или отсутствием опытных профильных специалистов и диагностического оборудования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.М. Хасанова — разработка концепции, общее руководство, редактирование; Е.М. Черных — разработка концепции, сбор, обработка данных, анализ данных, написание текста рукописи; А.А. Карякин — разработка концепции, анализ данных, статистическая обработка, написание текста рукописи; З.Э. Джафарова — сбор, обработка данных, написание текста рукописи; А.А. Ключас — сбор, обработка данных. 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. На проведение исследования получено положительное этическое заключение локального этического комитета ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» (протокол заседания № 09/10-2 от 26.10.2022).

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 проведении исследования и 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 неприменима.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. N.M. Khasanova: concept development, general management, editing; E.M. Chernykh: concept development, data collection, processing, data analysis, writing the manuscript; A.A. Karyakin: concept development, data analysis, statistical processing, writing the manuscript; Z.E. Dzhaфарova: collection, processing of data, writing of the manuscript; A.A. Klyukas: data collection and processing. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval. A positive ethical opinion was received for the study from the local ethics committee of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Northern State Medical University" (No. 09/10-2 dated October 26, 2022).

Funding sources. No funding.

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

Statement of originality. When conducting the research and creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. Editorial policy on data sharing not applicable to this work. Access to the data obtained in this study is closed due to confidential patient information.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Bösel J, Mathur R, Cheng L, et al. AI and neurology. *Neurol Res Pract*. 2025;7(1):11. doi: 10.1186/s42466-025-00367-2
- AbuAlrob MA, Mesraoua B. Harnessing artificial intelligence for the diagnosis and treatment of neurological emergencies: A comprehensive review of recent advances and future directions. *Front Neurol*. 2024;15:1485799. doi: 10.3389/fneur.2024.1485799
- Mainali S, Darsie ME, Smetana KS. Machine learning in action: Stroke diagnosis and outcome prediction. *Front Neurol*. 2021;12:734345. doi: 10.3389/fneur.2021.734345
- Abedi V, Kawamura Y, Li J, et al. Editorial: Machine learning in action: Stroke diagnosis and outcome prediction. *Front Neurol*. 2022;13:984467. doi: 10.3389/fneur.2022.984467
- Abedi V, Khan A, Chaudhary D, et al. Using artificial intelligence for improving stroke diagnosis in emergency departments: A practical framework. *Ther Adv Neurol Dis*. 2020;13:1756286420938962. doi: 10.1177/1756286420938962
- Rajashekar D, Hill MD, Demchuk AM, et al. Prediction of clinical outcomes in acute ischaemic stroke patients: A comparative study. *Front Neurol*. 2021;12:663899. doi: 10.3389/fneur.2021.663899
- Yang Y, Tang L, Deng Y, et al. The predictive performance of artificial intelligence on the outcome of stroke: A systematic review and meta-analysis. *Front Neurol*. 2023;17:1256592. doi: 10.3389/fnins.2023.1256592
- Qu S, Zhou M, Jiao S, et al. Optimizing acute stroke outcome prediction models: Comparison of generalized regression neural networks and logistic regressions. *PLoS One*. 2022;17(5):e0267747. doi: 10.1371/journal.pone.0267747
- Lee J, Park KM, Park S. Interpretable machine learning for prediction of clinical outcomes in acute ischemic stroke. *Front Neurol*. 2023;14:1234046. doi: 10.3389/fneur.2023.1234046
- Gaviria E, Eltayeb Hamid AH. Neuroimaging biomarkers for predicting stroke outcomes: A systematic review. *Health Sci Rep*. 2024;7(7):e2221. doi: 10.1002/hsr2.2221
- Pedersen M, Verspoor K, Jenkinson M, et al. Artificial intelligence for clinical decision support in neurology. *Brain Commun*. 2020;2(2):fcaa096. doi: 10.1093/braincomms/fcaa096
- Wang W, Kiik M, Peek N, et al. A systematic review of machine learning models for predicting outcomes of stroke with structured data. *PLoS One*. 2020;15(6):e0234722. doi: 10.1371/journal.pone.0234722
- Alyasein S, Alqaran R, Al-Aiad A. Using machine learning algorithms for predicting stroke disease-2024. In: 15th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), Irbid, Jordan; 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/ICICS63486.2024.10638280
- Heo J, Yoon JG, Park H, et al. Machine learning-based model for prediction of outcomes in acute stroke. *Stroke*. 2019;50(5):1263–1265. doi: 10.1161/STROKEAHA.118.024293
- Daidone M, Ferrantelli S, Tuttolomondo A. Machine learning applications in stroke medicine: Advancements, challenges, and future perspectives. *Neural Reg Res*. 2024;19(4):769–773. doi: 10.4103/1673-5374.382228
- Jeon ET, Jung SJ, Yeo TY, et al. Predicting short-term outcomes in atrial-fibrillation-related stroke using machine learning. *Front Neurol*. 2023;14:1243700. doi: 10.3389/fneur.2023.1243700
- Chernykh EM, Khasanova NM, Grzhibovsky AM, Bogdanova AI. Functional predictor variables in the acute period of stroke in patients living in the Arctic Macroregion: Multivariate modeling findings. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2024;6(4):336–347. doi: 10.36425/rehab637339 EDN: LNEYEF

18. Van der Groen O, Ghosh M, Norman R, et al. Point of view on outcome prediction models in post-stroke motor recovery. *Neurorehab Neural Rep.* 2024;38(5):386–398. doi: 10.1177/15459683241237975
19. Kiżer C, Lundquist CB, Brunner I. Knowledge and application of upper limb prediction models and attitude toward prognosis among physiotherapists and occupational therapists in the clinical stroke setting. *Top Stroke Rehabil.* 2021;28(2):135–141. doi: 10.1080/10749357.2020.1783915
20. Man S, Bruckman D, Uchino K, et al. Rural hospital performance in guideline-recommended ischemic stroke thrombolysis, secondary prevention, and outcomes. *Stroke.* 2024;55(10):2472–2481. doi: 10.1161/STROKEAHA.124.047071
21. Loccoh EC, Joynt Maddox KE, Wang Y, et al. Rural-urban disparities in outcomes of myocardial infarction, heart failure, and stroke in the United States. *J Am College Cardiol.* 2022;79(3):267–279. doi: 10.1016/j.jacc.2021.10.045
22. Ali F, Hamid U, Zaidat O, et al. Role of artificial intelligence in telestroke: An overview. *Front Neurol.* 2020;11:559322. doi: 10.3389/fneur.2020.559322
23. Zhou Y, Wu D, Yan S, et al. Feasibility of a clinical-radiomics model to predict the outcomes of acute ischemic stroke. *Korean J Radiol.* 2022;23(8):811–820. doi: 10.3348/kjr.2022.0160
24. Loggini A, Saleh Velez FG, Hornik J, et al. Validation of prognostic scales for functional outcome in ischemic stroke patients treated with intravenous thrombolysis in a rural setting. *Cerebrovasc Dis Extra.* 2024;14(1):148–157. doi: 10.1159/000541801
25. Alaka SA, Menon BK, Brobbey A, et al. Functional outcome prediction in ischemic stroke: a comparison of machine learning algorithms and regression models. *Front Neurol.* 2020;11:889. doi: 10.3389/fneur.2020.00889
26. Heo J, Yoon JG, Park H, et al. Machine learning-based model for prediction of outcomes in acute stroke. *Stroke.* 2019;50(5):1263–1265. doi: 10.1161/STROKEAHA.118.024293
27. Çelik G, Baykan ÖK, Kara Y, Tireli H. Predicting 10-day mortality in patients with strokes using neural networks and multivariate statistical methods. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2014;23(6):1506–1512. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.12.018
28. Zahidi NF, Tukiran Z, Tukiran I. Analyzing Classification Models: Random Forest vs. Neural Networks in Health Prediction. In: *2024 International Conference on Future Technologies for Smart Society (ICFTSS)*. Kuala Lumpur, Malaysia; 2024. P. 183–187. doi: 10.1109/ICFTSS61109.2024.10691342
29. Khairunnisa A, Notodiputro KA, Sartono B. A comparative study of random forest and double random forest models from view points of their interpretability. *Sci J Inform.* 2024;11(1). doi: 10.15294/sji.v11i1.48721

ОБ АВТОРАХ

*** Черных Екатерина Михайловна;**

адрес: Россия, 163069, Архангельск, пр. Троицкий, д. 51;
ORCID: 0000-0002-6523-7071;
eLibrary SPIN: 8296-2286;
e-mail: raduga0302@mail.ru

Хасанова Нина Минувалиевна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0003-0729-3726;
eLibrary SPIN: 6834-6281;
e-mail: khasanovanina@rambler.ru

Карякин Алексей Андреевич, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-4458-8702;
eLibrary SPIN: 7296-3303;
e-mail: biophysica@yandex.ru

Джафарова Зохра Эйвазовна;

ORCID: 0009-0003-2429-9158;
e-mail: zohrajafarova@yandex.ru

Клюкас Алексей Артемович;

ORCID: 0009-0005-3428-187X;
e-mail: alexeythekly@gmail.com

AUTHORS' INFO

*** Ekaterina M. Chernykh;**

address: 51 Troitsky ave, Arkhangelsk, Russia, 163069;
ORCID: 0000-0002-6523-7071;
eLibrary SPIN: 8296-2286;
e-mail: raduga0302@mail.ru

Nina M. Khasanova, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0003-0729-3726;
eLibrary SPIN: 6834-6281;
e-mail: khasanovanina@rambler.ru

Aleksey A. Karyakin, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0002-4458-8702;
eLibrary SPIN: 7296-3303;
e-mail: biophysica@yandex.ru

Zohra E. Dzhaifarova;

ORCID: 0009-0003-2429-9158;
e-mail: zohrajafarova@yandex.ru

Alexey A. Kliukas;

ORCID: 0009-0005-3428-187X;
e-mail: alexeythekly@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab681966>

EDN: OBCFEQ

Этиологическая структура возбудителей инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии, проходящих лечение и реабилитацию в отделениях реанимации и интенсивной терапии

Т.Р. Каменева^{1, 2}, С.А. Базанович¹, М.Ю. Юрьев¹, М.А. Жданова¹, М.А. Голубева¹,
Е.В. Лугинина¹, М.В. Петрова^{1, 3}

¹ Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия;

² Научно-исследовательский институт организации здравоохранения и медицинского менеджмента, Москва, Россия;

³ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Хроническое критическое состояние представляет синдром, в который входят зависимость от аппарата искусственной вентиляции лёгких, системная воспалительная реакция, полиорганная недостаточность, вторичная саркопения, синдром гиперметаболизма-гиперкатаболизма, белково-энергетическая недостаточность. Инфекции нижних дыхательных путей у данной категории пациентов в отделениях реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) остаются одной из существенных причин неблагоприятных исходов, удлинения сроков госпитализации и увеличения финансовых затрат на лечение. Адекватная эмпирическая антимикробная терапия инфекций нижних дыхательных путей невозможна без знаний об этиологической структуре и уровне резистентности ведущих возбудителей данной нозокомиальной инфекции в конкретном отделении медицинской организации.

Цель исследования — определить этиологическую структуру инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии, находящихся в ОРИТ, за период с 2020 по 2023 год, и их чувствительность к антибиотикам; выявить наиболее распространённые механизмы резистентности ведущих возбудителей и сформулировать рекомендации по оптимизации антимикробной терапии для данных пациентов.

Методы. В исследование включены пациенты с подтверждённой инфекцией нижних дыхательных путей, преимущественно в продлённом и хроническом критическом состоянии. Идентификацию микроорганизмов проводили на автоматическом анализаторе BD Phoenix 100. Для интерпретации чувствительности использовали критерии EUCAST.

Результаты. У 1007 пациентов в хроническом критическом состоянии в топ-10 ведущих возбудителей инфекций нижних дыхательных путей вошли преимущественно грамотрицательные микроорганизмы, при этом в динамике за указанный период отмечен рост *Acinetobacter baumannii* с 13,22% до 21,40% ($p < 0,001$) и уменьшение *Escherichia coli* с 7,90% до 2,98% ($p < 0,001$). Устойчивость *Klebsiella pneumoniae*, *A. baumannii* к карбапенемам за этот период времени значительно увеличилась — с 80,50% до 91,64% ($p < 0,001$) и с 89,89% до 98,14% ($p < 0,001$) соответственно. У продуцентов карбапенемаз *K. pneumoniae* выросла устойчивость к колистину с 4,95% до 9,00% ($p < 0,001$) и тигециклину с 48,76% до 71,28% ($p < 0,001$), к цефтазидиму/авибактаму — с 33,06% до 47,73% ($p = 0,041$).

Заключение. Преобладающими возбудителями инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии, находящихся в ОРИТ, были грамотрицательные бактерии с высоким уровнем антибиотикорезистентности, включая устойчивые к карбапенемам *K. pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *A. baumannii*. Анализ этиологической структуры инфекций нижних дыхательных путей и их чувствительности к антибиотикам у данной категории пациентов необходим для создания локальных протоколов эффективной эмпирической антимикробной терапии в каждом конкретном ОРИТ медицинской организации.

Ключевые слова: хроническое критическое состояние; инфекции нижних дыхательных путей; антибиотикорезистентность; *Klebsiella pneumoniae*; *Acinetobacter baumannii*.

Как цитировать:

Каменева Т.Р., Базанович С.А., Юрьев М.Ю., Жданова М.А., Голубева М.А., Лугинина Е.В., Петрова М.В. Этиологическая структура возбудителей инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии, проходящих лечение и реабилитацию в отделениях реанимации и интенсивной терапии // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 95–108. DOI: 10.36425/rehab681966 EDN: OBCFEQ

Рукопись получена: 02.06.2025

Рукопись одобрена: 12.06.2025

Опубликована online: 19.06.2025

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab681966>

EDN: OBCFEQ

Etiological Structure of Lower Respiratory Tract Pathogens in Treatment and Rehabilitation of Patients with Chronic Critical Illness in Intensive Care Units

Tatiana R. Kameneva^{1,2}, Sergey A. Bazanovich¹, Mikhail Yu. Yuriev¹, Maria A. Zhdanova¹, Marina A. Golubeva¹, Elena V. Luginina¹, Marina V. Petrova^{1,3}

¹ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, Russia;

² Research Institute for Healthcare Organization and Medical Management, Moscow, Russia;

³ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Chronic critical illness is characterized by ventilator dependence, systemic inflammatory response, multiorgan failure, secondary sarcopenia, hypermetabolism and hypercatabolism, and protein–energy malnutrition. In this category of intensive care unit patients, lower respiratory tract infections remain a significant cause of adverse outcomes, prolonged hospital stays, and increased treatment costs. It is impossible to provide adequate empirical treatment of lower respiratory tract infections without knowing the etiology and resistance of the leading pathogens of this nosocomial infection in a specific department of a healthcare organization.

AIM: The study aimed to characterize the etiology of lower respiratory tract infections in intensive care unit patients from 2020 to 2023, determine their antibiotic susceptibility, identify the most common resistance mechanisms of leading pathogens, and provide recommendations for optimizing antimicrobial therapy.

METHODS: The study included patients with confirmed lower respiratory tract infections, primarily those with prolonged or chronic critical illnesses, from 2020 to 2023. The BD Phoenix 100 automated analyzer was used to identify the pathogens. Susceptibility was interpreted using EUCAST criteria.

RESULTS: From 2020 to 2023, the top 10 pathogens responsible for lower respiratory tract infections in 1,007 patients were predominantly gram-negative microorganisms. For this period, the following trends were noted: an increase in *Acinetobacter baumannii* from 13.22% to 21.40% ($p < 0.001$), and a decrease in *Escherichia coli* from 7.90% to 2.98% ($p < 0.001$). From 2020 to 2023, the resistance of *Klebsiella pneumoniae* and *Acinetobacter baumannii* to carbapenems increased significantly, from 80.50% to 91.64% ($p < 0.001$) and from 89.89% to 98.14% ($p < 0.001$), respectively. Among carbapenemase-producing *Klebsiella pneumoniae*, resistance to colistin, tigecycline, and ceftazidime + avibactam increased from 4.95% to 9.00% ($p < 0.001$), from 48.76% to 71.28% ($p < 0.001$), and from 33.06% to 47.73% ($p = 0.041$), respectively.

CONCLUSION: The predominant pathogens causing lower respiratory tract infections in intensive care unit patients included Gram-negative bacteria with a high level of antibiotic resistance. These bacteria included carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Acinetobacter baumannii*. The etiological structure of lower respiratory tract infections and their antibiotic susceptibility in these patients should be evaluated to create local protocols for effective empirical antimicrobial therapy in each specific intensive care unit of a healthcare organization.

Keywords: chronic critical illness; infections of the lower respiratory tract; antibiotic resistance; *Klebsiella pneumoniae*; *Acinetobacter baumannii*.

To cite this article:

Kameneva TR, Bazanovich SA, Yuriev MYu, Zhdanova MA, Golubeva MA, Luginina EV, Petrova MV. Etiological Structure of Lower Respiratory Tract Pathogens in Treatment and Rehabilitation of Patients with Chronic Critical Illness in Intensive Care Units. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):95–108. DOI: 10.36425/rehab681966 EDN: OBCFEQ

Submitted: 02.06.2025

Accepted: 12.06.2025

Published online: 19.06.2025

Список сокращений

Критерии EUCAST (European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing) — критерии Европейского комитета по определению чувствительности к антимикробным препаратам

ОРИТ — отделение реанимации и интенсивной терапии

ФНКЦ РР — ФГБНУ «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии»

AMRmap — онлайн-платформа анализа данных резистентности к антимикробным препаратам в России

ОБОСНОВАНИЕ

Хронические реанимационные больные, пережившие острую фазу заболевания, представляют собой популяцию пациентов, нуждающихся в специализированной медицинской помощи в условиях отделения реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) в течение нескольких месяцев или лет. В середине 80-х годов XX века для таких пациентов был предложен термин «хроническое критическое заболевание» (chronic critical illness, CCI). Статистические данные показывают, что чаще всего причиной хронического критического состояния являются черепно-мозговая травма (42,57%), ишемический инсульт с исходом в вегетативное состояние (20,70%), внутримозговое или субарахноидальное кровоизлияние (17,50%) и гипоксия (10,17%) [1]. Хроническое критическое заболевание характеризуется полиорганными нарушениями у пациента и его длительным пребыванием в стационаре, высоким уровнем смертности, что обуславливает в целом значительное потребление ресурсов [2].

В последнее десятилетие отмечается отчётливая тенденция к увеличению количества пациентов (от 5 до 20%), длительно находящихся в отделении реанимации в хроническом критическом состоянии [3]. У большинства таких пациентов (>60%) диагностируется сепсис, который, как правило, развивается на фоне полиорганной недостаточности. Госпитальная смертность составляет около 30%, годовая выживаемость — менее 50%, к функциональной независимости возвращаются только 10% пациентов [4].

Современные диагностические и терапевтические возможности интенсивной терапии позволяют многим пациентам пережить острую фазу заболевания. Значительная часть пациентов с органной дисфункцией выживает после длительного пребывания в отделении интенсивной терапии с последующим развитием хронического критического состояния, которое характеризуется развитием синдрома стойкого воспаления, иммуносупрессии и катаболизма (persistent inflammation, immunosuppression, and catabolism syndrome, PICS) [5]. У пациентов, длительно находящихся в отделениях интенсивной терапии, наблюдается дисбактериоз кишечной микробиоты [6]. Лечение данной категории пациентов требует комплексного мультидисциплинарного подхода с привлечением большого

количества специалистов и использованием разнообразных методов диагностики, лечения и широкого перечня лекарственных препаратов [7].

Нозокомиальные инфекции являются одним из важных факторов, ограничивающих прогресс современной высокотехнологичной медицины. Согласно данным обзора Всемирной организации здравоохранения, в странах с высоким уровнем дохода в смешанной популяции пациентов частота нозокомиальных инфекций составляет 7,6 эпизодов на 100 пациентов, в странах со средним и низким уровнем доходов этот показатель достигает 10,1¹. В Российской Федерации распространённость нозокомиальных инфекций была проспективно оценена лишь в исследовании ЭРГИНИ: их частота составила 7,60%, при этом наибольшая распространённость была отмечена в ОРИТ (до 28,00%), а абсолютный оценочный показатель распространённости в России составил 2,3 млн случаев в год [8]. К основным формам нозокомиальных инфекций относятся инфекции дыхательных, мочевыводящих путей, центральной нервной системы, области хирургического вмешательства, а также инфекции кровотока, связанные с венозными катетерами. Одной из самых серьёзных проблем, связанных с нозокомиальными инфекциями, является высокий уровень антимикробной резистентности среди их возбудителей. Согласно оценкам международных экспертов, антимикробная резистентность является причиной более 700 тысяч смертельных случаев ежегодно (в том числе 22 тысячи случаев в Европе). Предполагается, что к 2050 году эта цифра может увеличиться до 10 млн человек [9]. Наиболее остро проблема антибиотикорезистентности актуальна для ОРИТ, где находятся на лечении самые тяжёлые пациенты с коморбидными заболеваниями, иммунодефицитом, в том числе в хроническом критическом состоянии, где используются инвазивные приспособления для мониторинга и лечения, существует высокий риск перекрёстного инфицирования, широко применяются антибиотики различных классов [10]. На сегодняшний день арсенал антимикробных препаратов

¹ World Health Organization [Internet]. Report on the burden of endemic health care-associated infection worldwide [cited 12 Jan 2011]. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/report-on-the-burden-of-endemic-health-care-associated-infection-worldwide>

для лечения инфекций у пациентов в хроническом критическом состоянии практически исчерпан ввиду наличия возбудителей с множественной лекарственной устойчивостью, что вызывает значительные трудности при выборе антимикробной терапии.

Цели исследования — определить этиологическую структуру инфекций нижних дыхательных путей за 2020–2023 годы у пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии в отделениях анестезиологии и реанимации ФГБНУ «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии» (ФНКЦ РР), и их чувствительность к антимикробным препаратам; выявить наиболее распространённые механизмы антибиотикорезистентности ведущих возбудителей и сформулировать рекомендации по оптимизации эмпирической антимикробной терапии для данных пациентов.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведён ретроспективный анализ базы данных микробиологической лаборатории по выявленным возбудителям инфекций нижних дыхательных путей и их чувствительности к антибиотикам у пациентов с подтверждённой инфекцией нижних дыхательных путей преимущественно в продлённом и хроническом критическом состоянии, обусловленном последствиями тяжёлых повреждений головного мозга (тяжёлая черепно-мозговая травма, инсульт, аноксия), находившихся на лечении в трёх отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР в 2020–2023 годах. Диагноз инфекции нижних дыхательных путей был подтверждён у всех пациентов в соответствии с диагностическими критериями, указанными в российских национальных рекомендациях «Нозокомиальная пневмония у взрослых» [11]. Взятие, хранение и транспортирование сред для микробиологического исследования выполнялись в соответствии с методическими указаниями МУ 4.2.203905 «Техника сбора и транспортирования биоматериала в микробиологические лаборатории»².

Критерии соответствия

Критерии включения: пациенты с подтверждённой инфекцией нижних дыхательных путей преимущественно в продлённом и хроническом критическом состоянии, обусловленном последствиями тяжёлых повреждений головного мозга (тяжёлая черепно-мозговая травма, инсульт, аноксия), проходившие лечение в трёх отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР в период с 2020 по 2023 год.

² Методические указания МУ 4.2.2039-05. 4.2. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Техника сбора и транспортирования биоматериалов в микробиологические лаборатории. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044664>

Условия проведения

Исследование проведено на базе ФНКЦ РР.

Продолжительность исследования

Проведён ретроспективный анализ базы данных микробиологической лаборатории за период с 2020 по 2023 год.

Описание исследования

С целью выявления возбудителей инфекции нижних дыхательных путей проводили микробиологическое исследование эндотрахеальных аспиратов и жидкости, полученной при бронхоальвеолярном лаваже. Выполняли микробиологические исследования респираторных образцов, осуществляя посев биоматериала на питательную среду — агар (кровяной, шоколадный, аزيدовый, уриселект, маннитол-солевой, Сабуро) с последующей инкубацией в течение 18–24 часов. Диагностически значимым считали микробный рост в титре 10^5 колониеобразующих единиц в 1 мл (КОЕ/мл) для эндотрахеального аспирата и 10^4 КОЕ/мл для бронхоальвеолярного лаважа. Выделенные из секрета дыхательных путей *Streptococcus viridans*, коагулазонегативные стафилококки, *Neisseria* spp., грибы не расценивали в качестве возбудителей пневмонии и трахеобронхита [11]. Идентификацию микроорганизмов проводили на автоматическом анализаторе BD Phoenix 100, определение чувствительности к антибиотикам изучали методом серийных микроразведений в среде «Мюллер–Хинтон» с определением минимально подавляющих концентраций. Для интерпретации чувствительности были использованы критерии Европейского комитета по определению чувствительности к антимикробным препаратам EUCAST v. 14.0 2024 года³. Штаммы с промежуточной чувствительностью «I» (intermediate — промежуточный) были отнесены к чувствительным изолятам. Для тех антибиотиков, к которым в настоящее время отсутствуют критерии чувствительности, применяли рекомендации EUCAST, предписывающие использовать либо фармакодинамические критерии, либо эпидемиологический порог отсечения (epidemiological cut-off)⁴. Для тигециклина значения минимальной подавляющей концентрации выше 2 мг/л отнесены к категории «R» (resistant — резистентный), что совпадает с данными, приведёнными в инструкции по медицинскому применению тигециклина⁵.

³ European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Breakpoint tables for interpretation of MICs and zone diameters. Version 14.0, valid from 2024-01-01. Available at: https://heijomed.de/wp-content/uploads/2024/01/Breakpoint_Tables-01.01.2024.pdf

⁴ EUCAST: The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. Available at: <https://www.eucast.org/>

⁵ Antimicrobial wild type distributions of microorganisms. Mic distributions include collated data from multiple sources, geographical areas and time periods and can never be used to infer rates of resistance. Available at: <https://mic.eucast.org/search/>

Статистический анализ

Данные по количеству выявленных инфекций нижних дыхательных путей и частоте выделения отдельных микроорганизмов по пациентам, проходившим лечение в ФНКЦ РР, получены из российской базы данных реанимационных пациентов (Russian Intensive Care Dataset, RICD) [12]. При анализе использовали количественные величины и процентные значения. Долю рассчитывали в процентах от общего количества десяти самых распространённых по выявляемости микроорганизмов (91,76% от общего числа выявленных инфекций нижних дыхательных путей) в трёх отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР. Чувствительность микроорганизмов к антибиотикам рассчитывали в процентах, исходя из соотношения резистентных штаммов к общему числу протестированных штаммов. Для долей выделенных микроорганизмов рассчитывался 95,00% доверительный интервал (95% ДИ). Для сравнения выявляемых микроорганизмов и резистентности штаммов к антибиотикам по годам использовали непараметрический критерий χ^2 Пирсона. Уровень значимости, при котором отвергалась нулевая гипотеза об отсутствии различий, был равен 0,05. Расчёт показателей осуществлялся с использованием программы для статистической обработки данных IBM SPSS Statistics 27. Построение графиков производилось с использованием комплексного программного обеспечения бизнес-анализа Microsoft Power BI.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В исследование включено 3615 клинически значимых микроорганизмов, выделенных из биологических жидкостей нижних дыхательных путей (бронхосмывов, эндотрахеальных аспиратов) 1007 пациентов (566 мужчин и 441 женщина, средний возраст 63 [49; 73] года), находившихся в трёх отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР в период с 2020 по 2023 год. В анализ этиологической структуры инфекций нижних дыхательных путей включены 10 самых распространённых по выявляемости возбудителей от 996 пациентов, или 3317 (91,76%) микроорганизмов от общего числа выявленных штаммов.

Основные результаты исследования

Проведённое нами исследование подтвердило явное преобладание грамотрицательной флоры в этиологической структуре инфекций нижних дыхательных путей у пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии в отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР (рис. 1; табл. 1–4). Ведущим возбудителем инфекций нижних дыхательных путей у данной категории пациентов стала *Klebsiella pneumoniae* (37,4%), вторым и третьим по встречаемости были представители неферментирующих грамотрицательных микроорганизмов — *Pseudomonas aeruginosa* (17,18%) и *Acinetobacter*

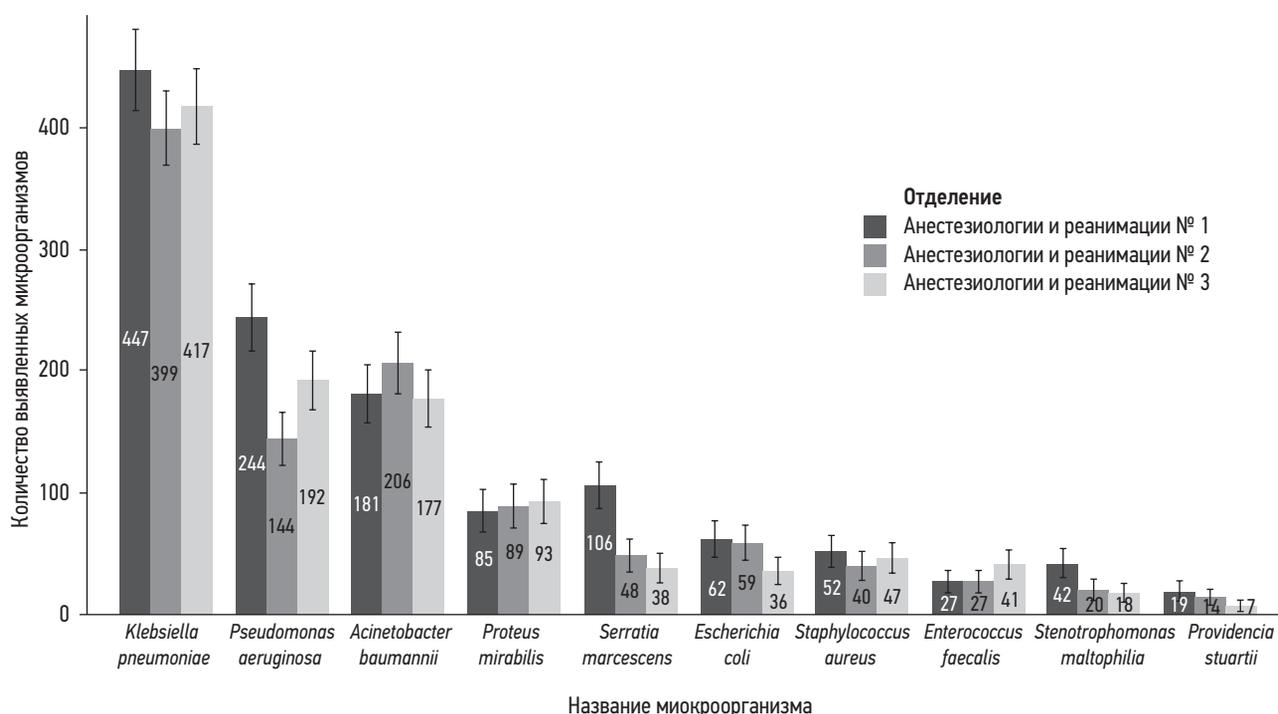


Рис. 1. Микроорганизмы, выделенные из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в трёх отделениях анестезиологии и реанимации за период с 2020 по 2023 год.

Fig. 1. Microorganisms isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in three intensive care units from 2020 to 2023.

Таблица 1. Микроорганизмы, выделенные из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделениях анестезиологии и реанимации в период с 2020 по 2023 год**Table 1.** Microorganisms isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in intensive care units from 2020 to 2023

Название микроорганизма	Доля выделенных микроорганизмов, %					p-value
	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
<i>K. pneumoniae</i>	34,77	38,57	37,78	37,87	37,40	0,447
<i>P. aeruginosa</i>	19,11	14,96	18,79	16,08	17,18	0,058
<i>A. baumannii</i>	13,22	15,92	16,22	21,40	16,70	<0,001*
<i>E. coli</i>	7,90	4,91	3,39	2,98	4,65	<0,001*
<i>S. marcescens</i>	6,47	7,16	3,90	5,45	5,69	0,016*
<i>P. mirabilis</i>	6,18	7,69	8,62	8,82	7,91	0,214
<i>S. aureus</i>	3,59	4,17	5,34	2,98	4,12	0,083
<i>E. faecalis</i>	3,30	2,56	3,39	1,95	2,81	0,249
<i>S. maltophilia</i>	3,16	2,99	1,64	1,82	2,37	0,083
<i>P. stuartii</i>	2,30	1,07	0,92	0,65	1,18	0,020*

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$).

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0.05$).

Таблица 2. Микроорганизмы, выделенные из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделении анестезиологии и реанимации № 1 в период с 2020 по 2023 год**Table 2.** Microorganisms isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in Intensive Care Unit No. 1 from 2020 to 2023

Название микроорганизма	Доля выделенных микроорганизмов, %					p-value
	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
<i>K. pneumoniae</i>	33,69	36,07	36,64	34,24	35,34	0,845
<i>P. aeruginosa</i>	23,30	14,48	21,49	18,68	19,29	0,024*
<i>A. baumannii</i>	13,98	13,11	12,12	19,46	14,31	0,060
<i>S. marcescens</i>	7,53	10,38	5,23	10,89	8,38	0,030*
<i>S. maltophilia</i>	5,38	4,10	1,93	1,95	3,32	0,045*
<i>P. mirabilis</i>	4,30	8,47	7,16	6,23	6,72	0,204
<i>E. coli</i>	3,58	5,74	5,79	3,89	4,90	0,431
<i>S. aureus</i>	2,87	4,10	6,06	2,72	4,11	0,120
<i>P. stuartii</i>	2,87	1,37	1,10	0,78	1,50	0,183
<i>E. faecalis</i>	2,51	2,19	2,48	1,17	2,13	0,671

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$).

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0.05$).

baumannii (16,70%). На долю других представителей порядка Enterobacterales в микробном спектре пришлось 7,91% на *Proteus mirabilis*, 5,69% на *Serratia marcescens*, 4,65% на *Escherichia coli*, 1,18% на *Providencia stuartii*. В топ-10 возбудителей нижних дыхательных путей у данных пациентов также вошли грамположительные микроорганизмы *Staphylococcus aureus* (4,12%) и *Enterococcus faecalis* (2,81%). На долю *Stenotrophomonas maltophilia* в микробном спектре пришлось 2,37%.

Важно отметить, что в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии отмечалось клинически и статистически значимое увеличение доли *A. baumannii* (с 13,22% до 21,40%; $p < 0,001$) и снижение долей *E. coli* (с 7,90% до 2,98%; $p < 0,001$), *S. marcescens* (с 6,47% до 5,45%; $p = 0,016$) и *P. stuartii* (с 2,30% до 0,65%; $p = 0,020$) (см. табл. 1).

Структура возбудителей инфекций нижних дыхательных путей в разрезе отделений анестезиологии

Таблица 3. Микроорганизмы, выделенные из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделении анестезиологии и реанимации № 2 в период с 2020 по 2023 год**Table 3.** Microorganisms isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in Intensive Care Unit No. 2 from 2020 to 2023

Название микроорганизма	Доля выделенных микроорганизмов, %					p-value
	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
<i>K. pneumoniae</i>	33,33	38,78	40,50	38,35	38,15	0,429
<i>A. baumannii</i>	10,95	21,22	21,50	22,58	19,69	0,007*
<i>P. aeruginosa</i>	13,43	11,84	14,64	14,70	13,77	0,754
<i>P. mirabilis</i>	6,97	9,39	7,79	9,68	8,51	0,669
<i>E. coli</i>	16,92	3,27	1,56	4,30	5,64	0,001*
<i>S. marcescens</i>	6,97	7,35	3,12	2,15	4,59	0,007*
<i>S. aureus</i>	4,48	3,27	3,74	3,94	3,82	0,928
<i>E. faecalis</i>	2,49	1,63	4,36	1,43	2,58	0,095
<i>S. maltophilia</i>	1,49	2,86	1,56	1,79	1,91	0,662
<i>P. stuartii</i>	2,99	0,41	1,25	1,08	1,34	0,117

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$).

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0.05$).

Таблица 4. Микроорганизмы, выделенные из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделении анестезиологии и реанимации № 3 за период 2020–2023 годов**Table 4.** Microorganisms isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in Intensive Care Unit No. 3 from 2020 to 2023

Название микроорганизма	Доля выделенных микроорганизмов, %					p-value
	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
<i>K. pneumoniae</i>	37,50	41,23	36,21	41,28	39,12	0,506
<i>P. aeruginosa</i>	18,98	17,85	20,00	14,89	18,01	0,482
<i>A. baumannii</i>	14,35	15,08	15,52	22,13	16,60	0,080
<i>P. mirabilis</i>	7,87	5,54	11,38	10,64	8,72	0,047*
<i>E. coli</i>	5,09	5,23	2,41	0,43	3,38	0,006*
<i>E. faecalis</i>	5,09	3,69	3,45	3,40	3,85	0,759
<i>S. marcescens</i>	4,63	3,38	3,10	3,40	3,56	0,816
<i>S. aureus</i>	3,70	4,92	6,21	2,13	4,41	0,134
<i>S. maltophilia</i>	1,85	1,85	1,38	1,70	1,69	0,970
<i>P. stuartii</i>	0,93	1,23	0,34	0,00	0,66	0,277

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$).

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0.05$).

и реанимации № 1, № 2 и № 3 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии представлена в табл. 2–4 соответственно. Так, в отделении анестезиологии и реанимации № 1 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии в структуре возбудителей инфекций нижних дыхательных путей выявлено клинически и статистически значимое увеличение доли *S. marcescens* (с 7,53% до 10,89%; $p=0,030$) и снижение долей

P. aeruginosa (с 23,30% до 18,68%; $p=0,024$) и *S. maltophilia* (с 5,38% до 1,95%; $p=0,045$) (см. табл. 2).

В отделении анестезиологии и реанимации № 2 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии в структуре возбудителей инфекций нижних дыхательных путей отмечалось клинически и статистически значимое увеличение доли *A. baumannii* (с 10,95% до 22,58%; $p=0,007$) и снижение долей *E. coli* (с 16,92% до 4,30%; $p=0,001$) и *S. marcescens* (с 6,97% до 2,15%; $p=0,007$) (см. табл. 3).

В отделении анестезиологии и реанимации № 3 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии в структуре возбудителей инфекций нижних дыхательных путей выявлено клинически и статистически значимое увеличение доли *P. mirabilis* (с 7,87% до 10,64%; $p=0,047$) и снижение доли *E. coli* (с 5,09% до 0,43%; $p=0,006$) (см. табл. 4).

Сведения о чувствительности ведущих грамотрицательных возбудителей инфекций нижних дыхательных путей к антибиотикам у пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии в отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР, представлены в табл. 5–8.

Уровень резистентности *K. pneumoniae* к цефалоспорином III–IV поколения, защищенным пенициллинам, защищенным цефалоспорином, фторхинолонам, аминогликозидам в период с 2020 по 2023 год у данной категории пациентов всегда оставался высоким, что свидетельствует о широком распространении продуцентов β -лактамаз расширенного спектра (см. табл. 5). Так, за наблюдаемый период времени клинически и статистически значимо увеличилась резистентность к амикацину (с 61,57% до 74,05%; $p < 0,001$), имипенему/циластатину (с 80,91% до 90,14%; $p < 0,001$), колистину (с 4,95% до 9,00%; $p < 0,001$), меропенему (с 80,50% до 91,64%; $p < 0,001$), тигециклину

(с 48,76% до 71,28%; $p < 0,001$), триметоприму/сульфаметоксазолу (с 71,90% до 76,12%; $p < 0,001$), фосфомицину (с 30,43% до 47,73%; $p=0,007$), цефтазидиму/авибактаму (с 33,06% до 33,06%; $p=0,041$). Особую тревогу вызывает неблагоприятная ситуация с устойчивостью *K. pneumoniae* к карбапенемам. Так, в 2023 году резистентность *K. pneumoniae* к эртапенему составила 97,22%, имипенему/циластатину — 90,14%, меропенему — 91,64%. Наиболее активным среди β -лактамных антибиотиков в отношении *K. pneumoniae* у данной категории пациентов являлся цефтазидим/авибактам, однако с 2020 по 2023 год отмечается рост устойчивости и к этому антибиотику (с 33,06% до 47,73%; $p=0,041$). Кроме того, отмечается рост устойчивости *K. pneumoniae* к не- β -лактамным антимикробным препаратам — тигециклину (с 48,76% до 71,28%; $p < 0,001$), триметоприму/сульфаметоксазолу (с 71,90% до 76,12%; $p < 0,001$) и фосфомицину (с 30,43% до 47,73%; $p=0,007$). Самую высокую активность *in vitro* в отношении *K. pneumoniae* продемонстрировал колистин: в 2020 году резистентность к нему составляла 4,95%, в 2023 году — 9,00%.

Устойчивость к антимикробным препаратам (цефалоспорины III–IV поколения, фторхинолоны, аминогликозиды, триметоприм/сульфаметоксазол) у другого представителя порядка Enterobacterales — *P. mirabilis* — в период

Таблица 5. Количество резистентных штаммов *K. pneumoniae*, выделенных из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделениях анестезиологии и реанимации в период с 2020 по 2023 год

Table 5. The number of resistant strains of *Klebsiella pneumoniae* isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in intensive care units from 2020 to 2023

Антибиотик	R	Резистентность штаммов, %					p-value
	МПК, мг/л	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
Амикацин	>16	61,57	77,84	72,05	74,05	72,16	<0,001*
Гентамицин	>2	82,64	77,56	82,47	82,35	81,07	0,256
Имипенем/циластатин	>4	80,91	79,44	77,69	90,14	81,65	<0,001*
Колистин	>2	4,95	5,30	5,34	9,00	6,25	<0,001*
Меропенем	>8	80,50	79,22	80,35	91,64	82,59	<0,001*
Пиперациллин/тазобактам	>4	97,52	96,12	97,26	98,96	97,37	0,167
Тигециклин	>2	48,76	64,27	65,56	71,28	63,27	<0,001*
Триметоприм/сульфаметоксазол	>4	71,90	80,06	62,74	76,12	72,55	<0,001*
Фосфомицин	>32	30,43	25,47	43,06	47,73	32,32	0,007*
Цефепим	>4	94,54	96,60	92,90	96,53	95,07	0,106
Цефтазидим	>4	94,61	93,84	93,33	95,85	94,31	0,552
Цефтазидим/авибактам	>8	33,06	21,88	28,89	47,73	32,13	0,041*
Цефтолозан/тазобактам	>2	94,96	92,00	91,15	94,48	92,86	0,426
Цефтриаксон	>2	95,04	95,01	92,52	96,18	94,57	0,200
Ципрофлоксацин	>0,5	97,11	97,23	93,42	97,58	96,18	0,014*
Эртапенем	>0,5	95,02	93,07	94,79	97,22	94,90	0,127

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$). МПК — минимально подавляющая концентрация; R — резистентный.

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0,05$). МПК, minimum suppressive concentration; R, resistant.

Таблица 6. Количество резистентных штаммов *P. mirabilis*, выделенных из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделениях анестезиологии и реанимации в период с 2020 по 2023 год**Table 6.** The number of resistant strains of *Proteus mirabilis* isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in intensive care units from 2020 to 2023

Антибиотик	R	Резистентность штаммов, %					p-value
	МПК, мг/л	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
Амикацин	>16	76,74	81,94	92,68	91,18	86,79	0,031*
Гентамицин	>2	97,67	97,22	98,80	97,06	97,74	0,885
Меропенем	>8	19,51	25,35	30,99	12,50	22,67	0,069
Пиперациллин/тазобактам	>4	11,63	29,17	35,80	20,59	26,14	0,019*
Триметоприм/сульфаметоксазол	>4	86,05	84,72	90,36	89,71	87,97	0,680
Фосфомицин	>32	76,92	88,00	79,17	-	83,33	0,615
Цефепим	>4	83,87	81,25	92,73	84,62	85,93	0,366
Цефтолозан/тазобактам	>2	0,27	0,27	0,29	0,25	0,27	0,992
Цефтриаксон	>2	90,70	91,55	95,18	95,59	93,58	0,595
Ципрофлоксацин	>0,5	97,67	88,89	95,18	97,06	94,36	0,113
Эртапенем	>0,5	28,57	33,33	32,50	17,91	28,35	0,161

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$). МПК — минимально подавляющая концентрация; R — резистентный.*Note.* *, differences are statistically significant ($p < 0.05$). МПК, minimum suppressive concentration; R, resistant.**Таблица 7.** Количество резистентных штаммов *A. baumannii*, выделенных из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделениях анестезиологии и реанимации в период с 2020 по 2023 год**Table 7.** The number of resistant strains of *Acinetobacter baumannii* isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in intensive care units from 2020 to 2023

Антибиотик	R	Резистентность штаммов, %					p-value
	МПК, мг/л	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
Амикацин	>8	96,63	98,66	99,34	99,38	98,73	0,250
Гентамицин	>4	96,63	98,66	98,68	95,03	97,27	0,146
Имипенем/циластатин	>4	93,26	97,99	99,34	100,00	98,18	0,002*
Колистин	>2	2,74	4,26	1,54	2,53	2,64	0,025*
Левовфлоксацин	>1	97,75	99,33	99,34	100,00	99,27	0,257
Меропенем	>8	89,89	97,32	99,33	98,14	96,90	<0,001*
Триметоприм/сульфаметоксазол	>4	85,39	94,63	90,07	95,63	92,17	0,015*
Ципрофлоксацин	>1	97,75	99,33	99,34	100,00	99,27	0,257

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$). МПК — минимально подавляющая концентрация; R — резистентный.*Note.* *, differences are statistically significant ($p < 0.05$). МПК, minimum suppressive concentration; R, resistant.

с 2020 по 2023 год всегда оставалась высокой (см. табл. 6). Так, у *P. mirabilis* клинически и статистически значимо увеличилась резистентность к амикацину (с 76,74% до 91,18%; $p=0,031$) и пиперациллину/тазобактаму (с 11,63% до 20,59%; $p=0,019$). Обращает на себя внимание сохранение чувствительности *P. mirabilis* к цефтолозану/тазобактаму (в 2023 году резистентность определялась только у 0,25% штаммов), карбапенемам (в 2023 году резистентность к эртапенему определялась у 17,91%, к меропенему —

у 12,50% штаммов), пиперациллину/тазобактаму (в 2023 году резистентность определялась у 20,59% штаммов).

В 2020–2023 годах у пациентов в хроническом критическом состоянии наиболее часто выделяемым представителем группы неферментирующих грамотрицательных бактерий был *A. baumannii*. Устойчивость штаммов *A. baumannii* в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии к аминогликозидам, фторхинолонам, карбапенемам,

Таблица 8. Количество резистентных штаммов *P. aeruginosae*, выделенных из биологических жидкостей нижних дыхательных путей пациентов в отделениях анестезиологии и реанимации в период с 2020 по 2023 год

Table 8. The number of resistant strains of *Pseudomonas aeruginosae* isolated from biological fluids of the lower respiratory tract in intensive care units from 2020 to 2023

Антибиотик	R	Резистентность штаммов, %					p-value
	МПК, мг/л	2020	2021	2022	2023	2020–2023	
Амикацин	>16	51,97	37,68	56,25	50,42	49,46	0,011*
Имипенем/циластатин	>4	89,06	86,33	84,09	90,83	87,21	0,329
Колистин	>2	8,89	6,00	5,33	2,52	5,45	0,007*
Левифлоксацин	>1	88,28	82,73	86,36	85,12	85,64	0,619
Меропенем	>8	81,25	78,42	83,44	91,67	83,27	0,043*
Пиперациллин/тазобактам	>16	69,53	64,75	69,32	64,17	67,14	0,671
Цефепим	>8	76,92	71,00	74,67	70,25	73,16	0,662
Цефтолозан/тазобактам	>4	26,32	58,70	63,38	48,28	54,12	0,023*
Ципрофлоксацин	>0,5	87,50	82,73	82,39	82,50	83,66	0,617

Примечание. * — различия статистически значимы ($p < 0,05$). МПК — минимально подавляющая концентрация; R — резистентный.

Note. *, differences are statistically significant ($p < 0.05$). МПК, minimum suppressive concentration; R, resistant.

триметоприму/сульфаметоксазолу всегда оставалась высокой (см. табл. 7).

В период с 2020 по 2023 год у *A. baumannii* клинически и статистически значимо увеличилась резистентность к имипенему/циластатину (с 93,26% до 100%; $p=0,002$), колистину (с 2,74% до 2,53%; $p=0,025$), меропенему (с 89,89% до 98,14%; $p < 0,001$), триметоприму/сульфаметоксазолу (с 85,39% до 95,63%; $p=0,015$). В 2023 году нечувствительными к амикацину оказались 99,38%, к гентамицину — 97,27%, левофлоксацину — 100%, ципрофлоксацину — 100%, имипенему/циластатину — 100%, меропенему — 98,14%, триметоприму/сульфаметоксазолу — 95,63% штаммов. Обращает на себя внимание сохранение чувствительности *A. baumannii* к колистину *in vitro*, вычисленной методом серийных микроразведений в среде «Мюллер–Хинтон» (в 2023 году резистентность составила всего 2,53%).

Устойчивость к антимикробным препаратам (цефалоспорины III–IV поколения, фторхинолоны, аминогликозиды, карбапенемы) у другого представителя порядка Enterobacterales — *P. aeruginosae* — в период с 2020 по 2023 год всегда оставалась высокой (см. табл. 8). В период с 2020 по 2023 год у *P. aeruginosa* клинически и статистически значимо увеличилась резистентность к меропенему (с 81,25% до 91,67%; $p=0,043$), цефтолозану/тазобактаму (с 26,32% до 48,28%; $p=0,023$) и уменьшилась к колистину (с 8,89% до 2,52%; $p=0,007$). В 2023 году нечувствительными к цефепиму было 70,25%, к ципрофлоксацину — 82,50%, левофлоксацину — 85,12%, имипенему/циластатину — 90,83%, меропенему — 91,67% штаммов. Обращает на себя внимание сохранение чувствительности *P. aeruginosa* к колистину *in vitro*, определённой методом серийных микроразведений в среде «Мюллер–Хинтон» (в 2023 году резистентность составила всего 2,52%).

Необходимо отметить, что продуцентами карбапенемаз являлись 100% штаммов *P. aeruginosa*, 93,90% штаммов *K. pneumoniae*, 40,07% штаммов *A. baumannii* и 20,22% штаммов *P. mirabilis*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Точное понимание этиологической структуры инфекций нижних дыхательных путей у пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии в ОРИТ, является основой для обоснования режимов эмпирической антимикробной терапии. В ходе общероссийского исследования ЭРГИНИ (2016) было установлено, что ведущей группой возбудителей нозокомиальных инфекций являются Enterobacterales, причём лидирующую позицию занимают *Klebsiella* spp. (21,3%), на долю *Acinetobacter* spp. приходится 11,9%, на долю *P. aeruginosa* — 7,7% [9]. Наше исследование подтвердило преобладающую роль грамотрицательной флоры в этиологической структуре инфекций нижних дыхательных путей в отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР за период с 2020 по 2023 год. Ведущими возбудителями инфекций нижних дыхательных путей стали *K. pneumoniae* (37,4%), *P. aeruginosa* (17,18%), *A. baumannii* (16,7%) и *P. mirabilis* (7,91%). Таким образом, изменения в этиологической структуре инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии в реанимационных отделениях заключаются в увеличении представителей порядка Enterobacterales (*K. pneumoniae*, *P. mirabilis*), неферментирующих грамотрицательных бактерий (*A. baumannii*, *P. aeruginosa*) и снижении роли грамположительных бактерий, что типично для медицинских организаций на территории России. По данным открытого онлайн-ресурса AMRmap

(<https://amrmap.ru>), ведущими возбудителями инфекций нижних дыхательных путей за период 2020–2022 годов в отделениях реанимации были *K. pneumoniae* (39,90%), *A. baumannii* (22,82%), *P. aeruginosa* (19,20%) и *P. mirabilis* (2,62%) [13].

Важно отметить, что структура возбудителей инфекций нижних дыхательных путей в разрезе отделений анестезиологии и реанимации № 1, № 2 и № 3 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии различалась по некоторым микроорганизмам (см. рис. 1 и табл. 2–4). Встречаемость *P. aeruginosa* в отделениях анестезиологии и реанимации клинически и статистически значимо отличалась друг от друга, при этом наибольшая выявляемость наблюдалась в отделении анестезиологии и реанимации № 1, наименьшая — в отделении анестезиологии и реанимации № 2. Доля *S. marcescens* и *S. maltophilia* в отделении анестезиологии и реанимации № 1 клинически и статистически значимо была выше по сравнению с отделениями анестезиологии и реанимации № 2 и № 3. Встречаемость *E. coli* в отделении анестезиологии и реанимации № 1 клинически и статистически значимо была выше по сравнению с отделением анестезиологии и реанимации № 3. Данная ситуация диктует необходимость проведения детального микробиологического мониторинга в каждом конкретном отделении реанимации с целью оптимизации протоколов эмпирической антимикробной терапии, проведения мероприятий инфекционного контроля по предупреждению и распространению нозокомиальных инфекций нижних дыхательных путей.

Мы вынуждены констатировать рост устойчивости возбудителей инфекций нижних дыхательных путей с 2020 по 2023 год у пациентов, находящихся в ОРИТ в хроническом критическом состоянии. Так, резистентность *K. pneumoniae* к меропенему составила 82,59%, к колистину — 6,25% (по данным AMRmap, 62,19% и 3,12% соответственно). Устойчивость *A. baumannii* к меропенему составила 96,90%, к колистину — 2,64%, триметоприму/сульфаметоксазолу — 92,17% (по данным AMRmap, 91,26%, 0,55% и 63,93% соответственно). Резистентность *P. aeruginosa* к меропенему составила 83,27%, к имипенему/циластатину — 87,21%, цефепиму — 73,16%, колистину — 5,45% (по данным AMRmap, 47,40%, 63,64%, 46,75% и 0% соответственно). Устойчивость *P. mirabilis* к меропенему составила 22,67%, к пиперациллину/тазобактаму — 26,14%, цефепиму — 85,93% (по данным AMRmap, 0%, 9,52% и 47,62% соответственно). Таким образом, устойчивость ведущих возбудителей нижних дыхательных путей у пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии в отделениях анестезиологии и реанимации ФНКЦ РР за период с 2020 по 2023 год, оказалась выше по сравнению с данными AMRmap. Это связано с тем, что 99% пациентов в хроническом критическом состоянии поступали в реанимационные отделения ФНКЦ РР из других стационаров, где длительность их пребывания в ОРИТ была намного более 3 дней, и имело место предшествующее применение антимикробных препаратов, в том числе

карбапенемов. Согласно стратегии контроля антимикробной терапии (СКАТ), все пациенты относились к IIIb–IV типу стратификации госпитализированных пациентов с инфекцией с учётом риска полирезистентных возбудителей и имели факторы риска наличия таких полирезистентных возбудителей, как *Enterobacterales*, вырабатывающих β-лактамазы расширенного спектра и карбапенемазы, карбапенеморезистентные неферментирующие грамотрицательные бактерии (*P. aeruginosa*, *Acinetobacter* spp.) у ряда пациентов — *Candida* spp. [14].

До недавнего времени препаратами выбора для этиотропного лечения инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии являлись карбапенемы, однако в настоящее время лекарственные препараты данного класса не могут рассматриваться в схемах антимикробной терапии как препараты первого ряда. В настоящее время у пациентов в хроническом критическом состоянии при инфекциях нижних дыхательных путей, вызванных *K. pneumoniae*, продуцирующей карбапенемазы, можно рекомендовать комбинацию цефтазида-авибактама с азтреонамом, а при невозможности применения данной комбинации — рассмотреть схему с включением полимиксинов, тигециклина, фосфомицина и/или аминогликозидов. При инфицировании *A. baumannii* показаны схемы с включением полимиксинов, тигециклина, сульбактама, при инфицировании *P. aeruginosa* — схемы с включением полимиксинов, азтреонама, фосфомицина [9]. Однако вызывает опасения продолжающийся рост резистентности грамотрицательной флоры к полимиксинам у данной категории пациентов [14].

В настоящее время лечение инфекций, вызванных полирезистентными бактериями, в том числе продуцентами карбапенемаз, вызывает значительные трудности из-за крайне ограниченного выбора эффективных антимикробных препаратов. Лечение таких пациентов характеризуется рядом негативных последствий, среди которых увеличение сроков госпитализации, ухудшение исходов лечения, а также рост прямых и непрямых затрат [15]. Потенциально многообещающей альтернативой применению антибиотиков у данной категории пациентов могут быть лечение и профилактика инфекций нижних дыхательных путей с использованием бактериофагов, коррекция микробиоты, а также применение комплекса мероприятий ранней реабилитации.

Важно отметить, что у пациентов в хроническом критическом состоянии, длительно находящихся в ОРИТ, наблюдается дисбактериоз кишечной микробиоты [6]. Кишечная микробиота пациентов в хроническом критическом состоянии характеризуется меньшим разнообразием и меньшим количеством ключевых родов комменсалов (таких как *Faecalibacterium prausnitzii*, *Blautia coccooides*, *Ruminococcus gnavus*), а в некоторых случаях — увеличением (до 50% и более от всего разнообразия) одного рода, например *Escherichia/Shigella*, *Salmonella*, *Enterococcus*, *Clostridium difficile* или *Staphylococcus*. Потеря

разнообразия микробиома тесно связана с тяжестью состояния пациентов, что подчёркивает клиническую значимость микробиома кишечника в интенсивной терапии критических состояний и его коррекции [16]. Большинство патогенов не действуют изолированно, поэтому инфекции имеют «полимикробные» фенотипы, а восприимчивость к инфекции может быть связана с исходным состоянием микробиоты и тяжестью инфекционного процесса. Такие взаимодействия между отдалённым органом и микробиомом кишечника всё чаще рассматриваются в научной литературе как теория осей кишечник–органы (кишечник–лёгкие, кишечник–мозг, кишечник–почки и кишечник–печень) [17].

Важное преимущество бактериофагов перед традиционной антибиотикотерапией состоит в том, что при их использовании вместо антибактериальных препаратов антимикробный результат достигается «пассивно», без участия клеток макроорганизма, организм «восстанавливается», что очень важно для пациентов, находящихся в хроническом критическом состоянии и нуждающихся в реабилитации [18]. Ранняя мобилизация является одним из видов вмешательства в рамках реабилитации, которая облегчает передвижение пациентов и увеличивает расход энергии с целью улучшения исходов. Мобилизация оптимизирует дыхание, центральную и периферическую перфузию, мышечный метаболизм и снижает риск венозного тромбообразования в нижних конечностях [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наше исследование подтвердило ведущую роль грам-отрицательной микрофлоры в этиологической структуре инфекций нижних дыхательных путей в ОРИТ у пациентов в хроническом критическом состоянии. Отмечено снижение роли грамположительных бактерий (*Staphylococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Enterococcus* spp.) в структуре возбудителей инфекций нижних дыхательных путей у данной категории пациентов. Среди возбудителей инфекций нижних дыхательных путей в разрезе отделений анестезиологии и реанимации № 1, № 2 и № 3 в период с 2020 по 2023 год у пациентов в хроническом критическом состоянии статистически и клинически значимо имелись различия.

Увеличение уровня антибиотикорезистентности среди доминирующих грамотрицательных микроорганизмов является значимой проблемой в ОРИТ. В настоящее время у пациентов в хроническом критическом состоянии при инфекциях нижних дыхательных путей, вызванных *K. pneumoniae*, продуцирующей карбапенемазы, можно рекомендовать комбинацию цефтазидима-авибактама с азтреонамом, а при невозможности применения данной комбинации — рассмотреть схему с включением полимиксинов, тигециклина, фосфомицина или аминогликозидов. При инфицировании *A. baumannii* показаны схемы с включением полимиксинов, тигециклина, сульбактама, при инфицировании *P. aeruginosa* — схемы с включением

полимиксинов, азтреонама, фосфомицина. Потенциально многообещающими направлениями в лечении инфекций нижних дыхательных путей у пациентов в хроническом критическом состоянии являются коррекция микробиоты, использование бактериофагов, ранняя реабилитация пациентов в условиях ОРИТ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Т.Р. Каменева, М.Ю. Юрьев — анализ данных, написание текста рукописи; С.А. Базанович — анализ данных, статистическая обработка, написание текста рукописи; М.А. Жданова — диагностика, сбор, обработка данных; М.А. Голубева — диагностика, сбор данных; Е.В. Лугинина — кураторство работы, одобрение статьи для публикации; М.В. Петрова — кураторство работы, рецензирование и одобрение статьи для публикации. 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. Заключение этического комитета ФНКЦ РР № 4/25 от 19.05.2025. Данное исследование является ретроспективным, все персональные данные защищены.

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 проведении исследования и 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 неприменима.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. T.R. Kameneva, M.Y. Yuryev: data analysis, writing the text of the manuscript; S.A. Bazanovich: data analysis, statistical processing, writing the text of the manuscript; M.A. Zhdanova: diagnostics, collection, processing of data; M.A. Golubeva: diagnostics, data collection; E.V. Luginina: curation of the work, approval of the article for publication; M.V. Petrova: curation of the work, review and approval of the article for publication. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval. Conclusion of the Ethics Committee of the FNCC PP No. 4/25 dated 05/19/2025. This study is retrospective, all personal data is protected, so the work does not need to be evaluated by experts of the ethics committee.

Funding sources. No funding.

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

Statement of originality. When conducting the research and creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work. Access to the data is closed by the decision of the author in order to protect copyrights until the final results are gained.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Hawkins RB, Raymond SL, Stortz JA, et al. Chronic critical illness and the persistent inflammation, immunosuppression, and catabolism syndrome. *Front Immunol.* 2018;9:1511. doi: 10.3389/fimmu.2018.01511
2. Nelson JE, Cox CE, Hope AA, Carson SS. Chronic critical illness. *Am J Respir Crit Care Med.* 2010;182(4):446–454. doi: 10.1164/rccm.201002-0210CI
3. Loss SH, Marchese CB, Boniatti MM, et al. Prediction of chronic critical illness in a general intensive care unit. *Rev Assoc Med Bras (1992).* 2013;59(3):241–247. doi: 10.1016/j.ramb.2012.12.002
4. Kahn JM, Le T, Angus DC, et al.; ProVent Study Group Investigators. The epidemiology of chronic critical illness in the United States. *Crit Care Med.* 2015;43(2):282–287. doi: 10.1097/CCM.0000000000000710
5. Rosenthal MD, Kamel AY, Rosenthal CM, et al. Chronic critical illness: Application of what we know. *Nutr Clin Pract.* 2018;33(1):39–45. doi: 10.1002/ncp.10024
6. Moron R, Galvez J, Colmenero M, et al. The importance of the microbiome in critically ill patients: Role of nutrition. *Nutrients.* 2019;11(12):3002. doi: 10.3390/nu11123002
7. Sharma R, Shultz SR, Robinson MJ, et al. Infections after a traumatic brain injury: The complex interplay between the immune and neurological systems. *Brain Behav Immun.* 2019;79:63–74. doi: 10.1016/j.bbi.2019.04.034
8. Yakovlev SV, Suvorova MP, Beloborodov VB, et al. Multicentre study of the prevalence and clinical value of hospital-acquired infections in emergency hospitals of Russia: ERGINI study. *Antibiotics and Chemotherapy.* 2016;61(5–6):32–42. EDN: UCKLSZ
9. Beloborodov VB, Goloshchapov OV, Gusarov VG, et al. Diagnosis and antimicrobial therapy of infections caused by polyresistant microorganisms (updated 2024). *Messenger of anesthesiology and resuscitation.* 2025;22(2):149–189. doi: 10.24884/2078-5658-2025-22-2-149-189 EDN: OCDHAC
10. Bassetti M, de Waele JJ, Eggmann P, et al. Preventive and therapeutic strategies in critically ill patients with highly resistant bacteria. *Intensive Care Med.* 2015;41(5):776–795. doi: 10.1007/s00134-015-3719-z
11. Gelfand BR, editor. *Nosocomial pneumonia in adults: Russian national guidelines.* 2nd ed., revised and updated. Moscow: Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo; 2016. 176 p. (In Russ.)
12. Grechko AV, Yadgarov MY, Yakovlev AA, et al. RICD: Russian Intensive Care Dataset. *General reanimatology.* 2024;20(3):22–31. doi: 10.15360/1813-9779-2024-3-22-31 EDN: BNQYQT
13. Kuzmenkov AY, Vinogradova AG, Trushin IV, et al. AMRmap is an antibiotic resistance monitoring system in Russia. *Clinical microbiology and antimicrobial chemotherapy.* 2021;23(2):198–204. doi: 10.36488/cmacc.2021.2.198-204 EDN: MCLEON
14. Yakovlev SV, Briko NI, Sidorenko SV, Protchenko DN, editors. The SKAT Program (Antimicrobial Therapy Control Strategy) in the provision of inpatient medical care: Russian clinical guidelines. Moscow; 2018. 156 p. (In Russ.)
15. Rello J, Kalwaje Eshwara V, Conway-Morris A, et al.; TOTEM Study Investigators. Perceived differences between intensivists and infectious diseases consultants facing antimicrobial resistance: A global cross-sectional survey. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis.* 2019;38(7):1235–1240. doi: 10.1007/s10096-019-03530-1
16. Lankelma JM, van Vught LA, Belzer C, et al. Critically ill patients demonstrate large interpersonal variation in intestinal microbiota dysregulation: A pilot study. *Intensive Care Med.* 2017;43(1):59–68. doi: 10.1007/s00134-016-4613-z
17. Jacobs MC, Haak BW, Hugenholtz F, Wiersinga WJ. Gut microbiota and host defense in critical illness. *Curr Opin Crit Care.* 2017;23(4):257–263. doi: 10.1097/MCC.0000000000000424
18. Beloborodova NV, Grechko AV, Gurova MM, et al. Adaptive phage therapy in the treatment of patients with recurrent pneumonia (pilot study). *General Reanimatol.* 2021;17(6):4–14. doi: 10.15360/1813-9779-2021-6-4-14 EDN: OYRHMD
19. Belkin AA, Alashev AM, Belkin VA, et al. Rehabilitation in the intensive care unit (RehabICU). Clinical practice recommendations of the national Union of Physical and Rehabilitation Medicine Specialists of Russia and of the national Federation of Anesthesiologists and Reanimatologists. *Alexander Saltanov intensive care herald.* 2022;(2):7–40. doi: 10.21320/1818-474X-2022-2-7-40 EDN: MEUVHV

ОБ АВТОРАХ

* **Каменева Татьяна Рудольфовна**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 107031, Москва, ул. Петровка, д. 25, стр. 2;
ORCID: 0000-0003-3957-5015;
eLibrary SPIN: 8625-7540;
e-mail: tkameneva@fnkcr.ru

Базанович Сергей Александрович;
ORCID: 0000-0001-5504-8122;
eLibrary SPIN: 8761-3828;
e-mail: sbazanovich@fnkcr.ru

Юрьев Михаил Юрьевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-0284-8913;
eLibrary SPIN: 9437-0360;
e-mail: myurev@fnkcr.ru

Жданова Мария Александровна;
ORCID: 0000-0001-6550-4777;
eLibrary SPIN: 4406-7802;
e-mail: mchubarova@fnkcr.ru

Голубева Марина Анатольевна;
ORCID: 0000-0001-6679-901X;
e-mail: mgolubeva@fnkcr.ru

AUTHORS' INFO

* **Tatiana R. Kameneva**, MD, Cand. Sci. (Medicine);
address: 25 Petrovka st, bldg 2, Moscow, Russia, 107031;
ORCID: 0000-0003-3957-5015;
eLibrary SPIN: 8625-7540;
e-mail: tkameneva@fnkcr.ru

Sergey A. Bazanovich;
ORCID: 0000-0001-5504-8122;
eLibrary SPIN: 8761-3828;
e-mail: sbazanovich@fnkcr.ru

Mikhail Yu. Yuriev, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-0284-8913;
eLibrary SPIN: 9437-0360;
e-mail: myurev@fnkcr.ru

Maria A. Zhdanova;
ORCID: 0000-0001-6550-4777;
eLibrary SPIN: 4406-7802;
e-mail: mchubarova@fnkcr.ru

Marina A. Golubeva;
ORCID: 0000-0001-6679-901X;
e-mail: mgolubeva@fnkcr.ru

Лугинина Елена Владимировна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-5580-1935;

eLibrary SPIN: 9881-8100;

e-mail: eluginina@fnkcr.ru

Петрова Марина Владимировна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-4272-0957;

eLibrary SPIN: 9132-4190;

e-mail: mpetrova@fnkcr.ru

Elena V. Luginina, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-5580-1935;

eLibrary SPIN: 9881-8100;

e-mail: eluginina@fnkcr.ru

Marina V. Petrova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0003-4272-0957;

eLibrary SPIN: 9132-4190;

e-mail: mpetrova@fnkcr.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab677150>

EDN: QSBBAK

Тренировка с биологической обратной связью по амплитуде коленного сустава у больных ишемическим церебральным инсультом: пилотное исследование

Д.В. Скворцов^{1, 2, 3}, А.Р. Худайгулова², С.Н. Кауркин^{1, 2}, Н.В. Гребенкина², Г.Е. Иванова^{1, 2}¹ Федеральный центр мозга и нейротехнологий, Москва, Россия;² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;³ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Нарушение сгибания коленного сустава паретичной конечности у больных, перенёсших инсульт, является одной из частых проблем при ходьбе. Метод биологической обратной связи (БОС) по кинематике суставов стал доступен для применения относительно недавно, и его возможности требуют исследования.

Цель исследования — определить возможность использования метода БОС для увеличения амплитуды сгибания коленного сустава у больных с гемипарезом в раннем восстановительном периоде после ишемического церебрального инсульта.

Методы. Пациенты основной группы ($n=11$; гемипарез; ранний восстановительный период после ишемического церебрального инсульта) выполняли курс тренировок с БОС по амплитуде сгибания коленного сустава и индивидуальную программу реабилитации. Группа сравнения ($n=11$) с теми же критериями отбора получала только стандартную реабилитацию. Биомеханическое исследование ходьбы и клиническую оценку с помощью шкал выполняли до и после курса лечения. В группу контроля вошли практически здоровые добровольцы ($n=34$).

Результаты. Клиническая оценка по используемым шкалам показала достоверное улучшение ($p < 0,05$) состояния, как и два домена Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья. Функционально наблюдаются общие закономерности, характерные для гемипаретической походки: уменьшение опороспособности паретичной конечности, нарушение реципрокности, асимметрия шага; также наблюдается снижение амплитуды сгибания суставов вследствие относительного удлинения конечности на стороне пареза. Мышечная активность снижена практически во всех группах, особенно в мышцах голени, что отражает уменьшение амплитуды сгибания голеностопного сустава и синдром отвисающей стопы; отсутствие высокоамплитудного сгибания обусловлено слабостью задней группы мышц бедра. Анализ фаз цикла шага в основной группе выявил достоверное снижение ($p < 0,05$) периода опоры на контралатеральной стороне и уменьшение величины суммарного периода двойной опоры. Результатом уменьшения периода опоры на здоровой стороне является снижение нагрузки на неё из-за более равномерной опороспособности обеих конечностей. Результатом эффективности БОС при данном типе тренировки является достоверное увеличение ($p < 0,05$) маховой амплитуды коленного сустава на стороне пареза в период переноса (именно эта амплитуда и была целью БОС-тренировки). В группе сравнения данная амплитуда достоверно не изменилась.

Заключение. БОС-тренировки продолжительностью 20 минут в течение 10 дней способствуют уменьшению асимметрии шага, повышению выносливости и безопасности при ходьбе. Метод БОС является неинвазивным, немедикаментозным способом лечения с минимальными противопоказаниями, что делает его перспективным в реабилитации постинсультных нарушений, в частности в восстановлении амплитуды сгибания коленного сустава и улучшении опороспособности паретичной конечности у пациентов в раннем восстановительном периоде после ишемического инсульта.

Ключевые слова: церебральный инсульт; ходьба; гемипарез; биологическая обратная связь; коленный сустав.

Как цитировать:

Скворцов Д.В., Худайгулова А.Р., Кауркин С.Н., Гребенкина Н.В., Иванова Г.Е. Тренировка с биологической обратной связью по амплитуде коленного сустава у больных ишемическим церебральным инсультом: пилотное исследование // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 109–124. DOI: 10.36425/rehab677150 EDN: QSBBAK

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab677150>

EDN: QSBBAK

Biofeedback Training for Knee Joint Range of Motion in Patients with Ischemic Cerebral Stroke: a Pilot Study

Dmitry V. Skvortsov^{1, 2, 3}, Aliya R. Khudaigulova², Sergey N. Kaurkin^{1, 2}, Natalya V. Grebenkina², Galina E. Ivanova^{1, 2}

¹ Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies, Moscow, Russia;

² The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia;

³ Federal Research and Clinical Center of Specialized Medical Care and Medical Technologies, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: After a stroke, patients often have impaired knee flexion of the paretic limb, which is one of the most common issues affecting walking ability. Biofeedback on joint kinematics is a relatively new technology that requires further research to understand its capabilities.

AIM: The study aimed to evaluate the potential of using biofeedback to improve knee flexion range of motion in patients with hemiparesis during the early recovery period after ischemic cerebral stroke.

METHODS: The main group of patients ($n = 11$; hemiparesis; early recovery period after ischemic cerebral stroke) completed a biofeedback training program for knee flexion range of motion, as well as a personalized rehabilitation program. The comparison group ($n = 11$) had the same selection criteria but received only standard rehabilitation. A biomechanical gait evaluation and clinical evaluation using various scales were performed before and after treatment. The control group included practically healthy volunteers ($n = 34$).

RESULTS: A clinical evaluation using the scales showed significant improvement ($p < 0.05$), as did two domains of the International Classification of Functioning, Disability, and Health. General functional patterns typical of hemiparetic gait were observed: decreased ability to support weight on the paretic limb, impaired reciprocity, and step-to-step asymmetry. In addition, a decrease in joint flexion range of motion was observed due to the paretic limb becoming relatively longer. Muscle activity decreased in nearly all muscle groups, particularly the calf muscles. This decrease reflected a reduction in ankle flexion range of motion and a condition known as drop foot. The absence of high-amplitude flexion was due to the weakness of the posterior thigh muscles. Analysis of step cycle phases in the main group revealed significant decreases ($p < 0.05$) in the contralateral support and total double support phases. Reduced support on the healthy side led to a decreased load because both limbs provide more uniform support. This type of biofeedback training significantly increased ($p < 0.05$) the swing range of motion of the paretic knee during weight transfer. This range of motion was the target of biofeedback training. The comparison group showed no significant change in the range of motion.

CONCLUSION: Biofeedback training lasting 20 minutes for 10 days helps to reduce step asymmetry, increase endurance, and improve safety when walking. Biofeedback training is a promising noninvasive, non-drug treatment option for poststroke disorders. It has minimal contraindications and can be used to restore knee joint flexion range of motion and improve the support capacity of the paretic limb in patients during the early recovery period after ischemic stroke.

Keywords: cerebral stroke; gait; hemiparesis; biofeedback; knee joint.

To cite this article:

Skvortsov DV, Khudaigulova AR, Kaurkin SN, Grebenkina NV, Ivanova GE. Biofeedback Training for Knee Joint Range of Motion in Patients with Ischemic Cerebral Stroke: a Pilot Study. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):109–124. DOI: 10.36425/rehab677150 EDN: QSBBAK

Submitted: 14.03.2025

Accepted: 26.05.2025

Published online: 19.06.2025

Список сокращений

БОС — биологическая обратная связь

МКФ — Международная классификация функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья

Клинические шкалы

ШРМ — шкала реабилитационной маршрутизации

BBS (Berg Balance Scale) — шкала баланса Берг

BI (Barthel Index) — шкала Бартел

DGI (Dynamic Gait Index) — динамический индекс ходьбы

HAI (Hauser Ambulation Index) — индекс ходьбы Хаузера

10 Meter Walk Test (10MWT) — тест 10-метровой ходьбы

MRC (Medical Research Council Weakness Scale) — шкала оценки мышечной силы в нижних конечностях

mRS (Modified Rankin Scale) — модифицированная шкала Рэнкина

RMI (Rivermead Mobility Index) — индекс мобильности Ривермид

TUG (Timed Up and Go Test) — тест «Встань и иди»

Пространственно-временные параметры

ВПС — высота подъема стопы, см

ДО — суммарный период двойной опоры

ПО — период опоры

ПОО — период одиночной опоры

ПДО — период двойной опоры

НВДО — начало второй двойной опоры

ЦШ — цикл шага

V (лат. *velocitas*) — скорость ходьбы, км/ч

Кинематические параметры

Га0 — начальная амплитуда голеностопного сустава

Га1 — амплитуда первого разгибания голеностопного сустава

Га2 — амплитуда первого сгибания голеностопного сустава

Га3 — амплитуда второго разгибания голеностопного сустава

Га4 — амплитуда второго сгибания голеностопного сустава

Ка1 — амплитуда первого сгибания коленного сустава

Ка2 — амплитуда первого разгибания коленного сустава

Ка3 — амплитуда второго сгибания коленного сустава

Та1 — амплитуда сгибания тазобедренного сустава в начале ходьбы

Та2 — полное разгибание тазобедренного сустава в конце периода опоры

Та3 — сгибание тазобедренного сустава в период переноса

Параметры мышц

ЭМГ — электромиография

TibA1 и TibA2 — первая и вторая амплитуды *m. tibialis anterior* (передняя большеберцовая мышца)

TriA — максимальная амплитуда *m. triceps surae* (трёхглавая мышца голени)

QfA1 и QfA2 — первая и вторая амплитуды *m. quadriceps femoris* (четырёхглавая мышца бедра)

HmA — максимальная амплитуда *m. hamstring* (задняя группа мышц бедра)

ОБОСНОВАНИЕ

Инсульт остаётся одной из главных причин инвалидности в мире. Больше половины людей, перенёвших инсульт, умирают. Выжившие, как правило, имеют стойкие нарушения, появившиеся в результате поражения головного мозга [1]. Существующие методы восстановления имеют доказанную эффективность. Продолжаются поиски различных способов для минимизации осложнений инсульта, в том числе и в отношении двигательных нарушений.

Типичный для последствий инсульта синдром Вернике–Манна, формирующийся при центральном гемипарезе, развивается у 80% пациентов, перенёвших инсульт [2], стереотип ходьбы при этом характеризуется рядом симптомов, компенсацией относительного удлинения

нижней конечности. У таких больных возникает потребность в посторонней помощи, дополнительных средствах опоры и ортезах; возрастает риск падения [3]. Одним из вариантов нарушения (до 75%) является снижение амплитуды сгибания коленного сустава [4], при котором малая амплитуда ограничивает и делает невозможным нормальное осуществление переноса конечности вперёд: пациенту проще перенести прямую ногу по дуге через сторону, отводя здоровую ногу в тазобедренном суставе в период опоры. Дополнительно ситуацию может ухудшить переразгибание колена в момент опоры (встречается у 68% больных) [5]. Причиной такой патологии является слабость и недостаточность функции четырёхглавой мышцы бедра, в результате чего коленный сустав не может быть активно замкнут её напряжением. Коленный сустав становится не подкосоустойчивым,

и пациент находит единственную для него (без посторонней помощи) возможность — замкнуть сустав пассивно связочным аппаратом в положении полного разгибания [6]. Таким образом, нагрузка на паретичную конечность приобретает явно патологический характер.

В арсенале реабилитологов достаточно много способов для восстановления функции ходьбы, в том числе для улучшения сгибания коленного сустава при центральном гемипарезе. Помимо фармакологического (инъекции ботулотоксина, лидокаина в спазмированные мышцы) и хирургического (перемещение сухожилия прямой мышцы бедра поражённой стороны на медиальные сгибатели колена) лечения [7], широко применяются немедикаментозные способы реабилитации, такие как использование различных видов экзоскелета [8, 9], функциональная электростимуляция [10], физические упражнения с применением механотерапии [11] и проприоцептивные тренировки с помощью различных технологий [12, 13]; для профилактики пассивного замыкания коленного сустава и его дальнейшего разрушения активно используются ортезы [14, 15], в том числе с устанавливаемой амплитудой сгибания. Каждый из этих методов в разной степени доказывает свою эффективность, однако некоторые авторы отдают предпочтение, например, тренировке проприоцепции, в том числе с применением биологической обратной связи (БОС) [16].

БОС может быть применена и как самостоятельный метод, однако в силу технической сложности проведения таких исследований и анализа данных число таких работ в доступной литературе ограничено. Результаты исследования 1983 года свидетельствуют, что переобучение ходьбе с электрогониометрической обратной связью при помощи звукового сигнала способствовало уменьшению гиперэкстензии паретического колена [17]. Похожим способом в 1992 году удалось выявить достоверное улучшение по сравнению с результатами контрольной группы, в которой также использовалась слуховая обратная связь [18]. Долгосрочный эффект при таком способе использования электрогониометрической обратной связи был обнаружен исследователями в 1989 году, и положительный результат удалось сберечь в течение одного года [19]. В 1996 году E. Ceceli и соавт. [20] представили данные, полученные при повторной диагностике через 6 месяцев, демонстрирующие сохранение полученного эффекта от обратной связи по сравнению с результатами контрольной группы.

Вероятно, технологии БОС могут быть эффективными как самостоятельно, так и в комбинации с традиционными способами реабилитации. Такой способ переобучения ходьбе достаточно безопасен и практически не имеет противопоказаний при адекватном понимании и правильном выполнении заданий. Приведённые экспериментальные работы не были продолжены по причине

отсутствия доступного оборудования для целенаправленной БОС-тренировки с использованием параметра амплитуды коленного сустава. В последние 5 лет такое оборудование стало производиться серийно, однако технология применения и эффективность метода остаются по-прежнему малоизученными.

Цель исследования — определить возможность использования метода биологической обратной связи для целенаправленного увеличения амплитуды сгибания коленного сустава у больных с гемипарезом в раннем восстановительном периоде после ишемического церебрального инсульта.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Экспериментальное нерандомизированное интервенционное продольное пилотное исследование.

Критерии соответствия

Критерии включения: пациенты с гемипарезом в раннем восстановительном периоде (1–6 месяцев) после впервые возникшего ишемического инсульта; возраст до 75 лет; функциональная готовность к вертикализации; адекватная реакция на пробу с ортостазом; самостоятельная ходьба (возможно использование дополнительных средств опоры); ясное сознание с уровнем бодрствования, достаточным для усвоения и выполнения инструкций при проведении исследования и тренировок; отсутствие когнитивных нарушений, препятствующих пониманию поставленных исследователем задач; отсутствие сенсомоторной афазии; отсутствие декомпенсированной соматической патологии, ишемических изменений на электрокардиограмме, сердечной недостаточности (II класс и выше по Killip); отсутствие заболеваний центральной и периферической нервной системы, помимо инсульта, сопровождаемых неврологическим дефицитом (последствия травм, опухоли, полинейропатии и т.п.); отсутствие ортопедической патологии (суставные деформации и контрактуры, выраженный болевой синдром, ампутации конечностей и др.).

Критерии исключения: систематическая неадекватная реакция сердечно-сосудистой системы во время проведения тренировки; страх ходьбы по тредмилу; отказ пациента от проведения лечебных мероприятий; отрицательная динамика неврологического и/или соматического статуса в процессе реабилитации.

Условия проведения

Исследование выполнено в лаборатории биомеханики Научно-исследовательского центра медицинской реабилитации ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства России.

Продолжительность исследования

Исследование проводилось в период с мая по ноябрь 2024 года.

Описание медицинского вмешательства

В исследование включены 11 пациентов, которым был проведён курс БОС-тренировки для увеличения амплитуды сгибания в коленном суставе в раннем восстановительном периоде после полушарного церебрального инсульта в бассейне средней мозговой артерии.

Используемые клинические шкалы. Шкалы, определяющие возможности самообслуживания: шкала Бартел для оценки уровня повседневной активности пациента для решения вопроса о его нуждаемости в уходе (Barthel Index, BI; F.I. Mahoney, 1965), индекс мобильности Ривермид для оценки ходьбы и подвижности пациента (Rivermead Mobility Index, RMI; C.L. Hsieh, 2000). Шкалы, ответственные за тяжесть состояния и маршрутизацию пациентов после инсульта: модифицированная шкала Рэнкина (Modified Rankin Scale, mRS; J.C. van Swieten, 1988), шкала реабилитационной маршрутизации (ШРМ; А.А. Белкин, 2021). Клинические шкалы, оценивающие ходьбу: тест «Встань и иди» (Timed Up and Go Test, TUG; P. Peggy, 2017), индекс ходьбы Хаузера (Hauser Ambulation Index, HAI; S.L. Hauser, 1983), тест 10-метровой ходьбы (10 Meter Walk Test, 10MWT; M.J. Watson, 2002), а также шкала баланса Берг, диагностирующая равновесие пациента (Berg Balance Scale, BBS; K. Miyata, 2022). Использовалась также шкала, оценивающая мышечную силу в нижних конечностях (Medical Research Council Weakness Scale, MRC; T. Paternostro-Sluga, 2008).

Методика оценки функции ходьбы. Для объективной диагностики ходьбы выполнялись два биомеханических исследования: первое — до выполнения реабилитационных мероприятий, второе — после курса БОС-тренировок и лечения. Оценку проводили с помощью комплекса «Стэдис» (Нейрософт, Иваново). Использовали комплект (7 единиц) инерционных сенсоров «Нейросенс», которые с помощью эластичных лент крепили на область крестца, верхнюю треть бедра и нижнюю треть голени с наружных сторон, тыла обеих стоп.

С помощью имеющихся на сенсорах каналов возможна регистрация электромиографического сигнала (ЭМГ-сигнал) с крупных мышечных групп нижних конечностей. Регистрировали электрическую активность мышц бедра: суммарную активность четырёхглавой мышцы бедра, суммарную активность двуглавой и полусухожильной мышцы, мышц голени — передней большеберцовой мышцы и суммарную активность наружной и внутренней головок трёхглавой. Использовали одноразовые поверхностные электроды Mederen (Китай).

После прикрепления всех сенсоров и электродов пациент принимал нейтральное положение для калибровки: положение стоя прямо, стопы на ширине плеч, руки

выпрямлены вдоль тела, тазобедренные и коленные суставы выпрямлены, взгляд прямо перед собой. Регистрацию биомеханических параметров производили во время ходьбы пациента на дистанции 10 м в произвольном темпе, который разворачивался каждый раз в конце и снова продолжал движение.

Согласно базовым установкам программы, шаги с неустановившимися параметрами (разгон и торможение) программное обеспечение автоматически отбрасывает. Остальные циклы шага калькулируются. Регистрация завершается при достижении 40 циклов шага по каждой ноге. Программное обеспечение при помощи нейросети определяло цикл шага (ЦШ) для каждой ноги и в соответствии с ними рассчитывало остальные показатели ходьбы. Для последующего анализа были выбраны следующие биомеханические параметры: временные — длительность ЦШ в секундах. Отдельные временные периоды ЦШ измеряли в процентах от ЦШ: период опоры (ПО), период одиночной опоры (ПОО), суммарный период двойной опоры (ДО) и параметр начала ЦШ другой ноги (начало второй двойной опоры, НВДО); пространственные: высота подъёма стопы (ВПС, в см) и скорость ходьбы (V, км/ч).

Кинематические параметры регистрировали для тазобедренного, коленного и голеностопного суставов в сагитальной плоскости (сгибание-разгибание) с построением гониограммы за ЦШ с последующим определением следующих показателей: тазобедренный сустав оценивался по амплитуде в начале ходьбы (Га1), полного разгибания (Та2) и сгибания в период переноса (Та3). Параметры коленного сустава включали амплитуду первого сгибания (Ка1), первого разгибания (Ка2) и второго сгибания (Ка3). Голеностопный сустав оценивался по амплитуде первого разгибания (Га1), первого сгибания (Га2), второго разгибания (Га3) и второго сгибания (Га4). На рис. 1 представлены основные амплитуды в зависимости от ЦШ для вышеперечисленных суставов.

Биоэлектрическую активность мышц исследовали по максимальным амплитудам в микровольтах (мВ). *Musculus tibialis anterior* (передняя большеберцовая мышца) имела два пика биоэлектрической активности (TibA1 и TibA2). Профиль *m. triceps surae* (трёхглавая мышца голени) представлен одним пиком активности (TriA). Активность *m. quadriceps femoris* (четырёхглавая мышца бедра) определяется двумя пиками (QfA1 и QfA2). У группы *m. hamstring* (задняя группа мышц бедра) имеется один пик (HmA). Наглядно профили биоэлектрической активности мышц в зависимости от ЦШ продемонстрированы на рис. 2.

Методика БОС-тренировки. На базе комплекса «Стэдис» возможно проведение БОС-тренировки с установлением конкретного целевого параметра. В данном случае таким параметром была определена амплитуда сгибания коленного сустава. В начале каждой тренировочной сессии производили оценку гониограммы

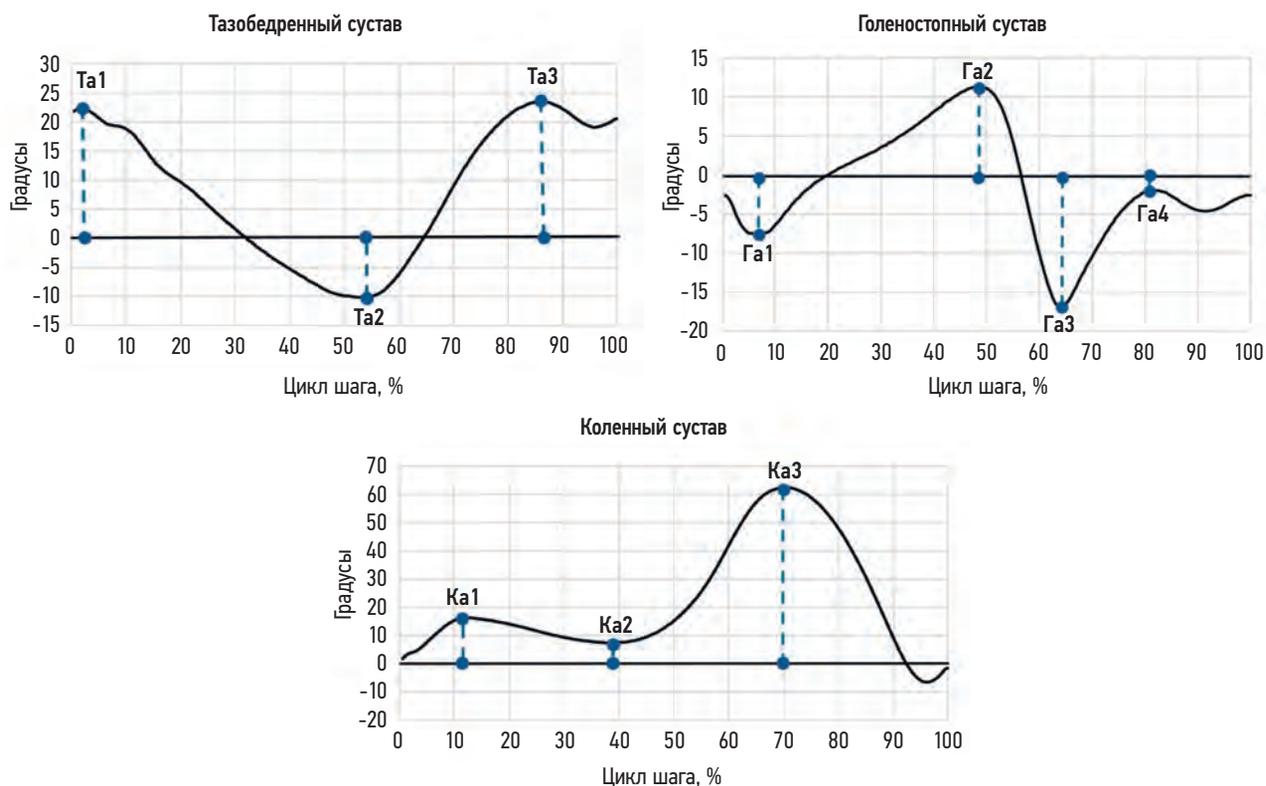


Рис. 1. Основные амплитуды тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, анализируемые в работе (гониограммы движений суставов в цикле шага и обозначения амплитуд).

Fig. 1. Key amplitudes of the hip, knee, and ankle joints analyzed in the study. The goniograms of joint movements during the gait cycle are presented, along with the corresponding amplitude notations.

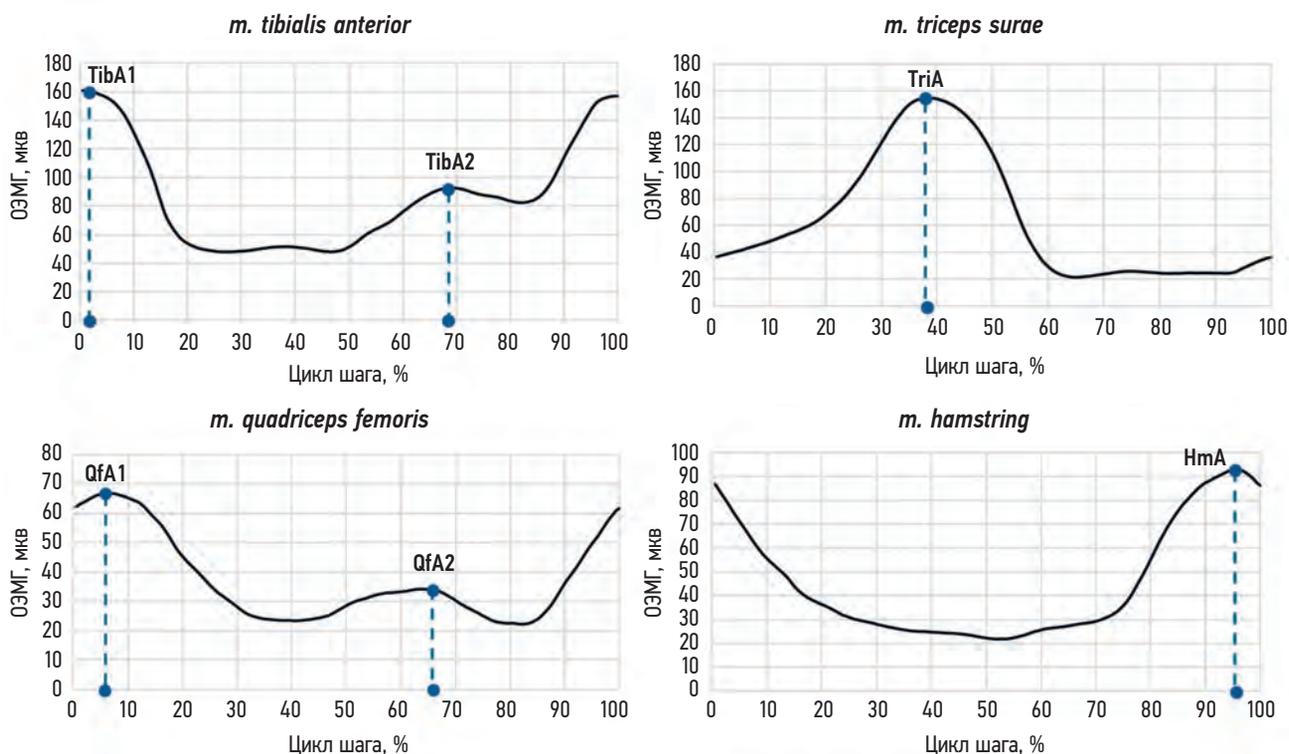


Рис. 2. Профили биоэлектрической активности мышц в цикле шага и основные анализируемые амплитуды. ОЭМГ — огибающая электромиография.

Fig. 2. Profiles of muscle bioelectrical activity in the gait cycle and the main analyzed amplitudes. ОЭМГ, envelope electromyography.

коленных суставов с помощью пяти инерционных сенсоров, закреплённых с помощью эластичных лент на уровне латеральных лодыжек голени, верхней трети бедра и крестца. Для этого пациента устанавливали на беговой дорожке (Runner RHC500, Air Machine, Италия), подбирали ему комфортный режим скорости и начинали двухминутную биомеханическую оценку. По окончании диагностики выводился протокол с пространственно-временными параметрами ходьбы с отметками параметров, выходящих за пределы нормы и гониограммами коленных суставов.

Далее выбирали тренируемый параметр — амплитуду коленного сустава. По желанию пациента определялась виртуальная среда, и начиналась процедура БОС-тренировки (рис. 3). На мониторе перед пациентом транслируется виртуальная среда с двумя столбиками, каждый из которых отображает выбранный параметр с левой и правой нижней конечности. Задаётся видимый диапазон, выход за пределы которого выявляется программой как ошибочный. Это затрудняет продвижение пациента по виртуальной среде, тем самым являясь подсказкой для правильного выполнения заданий. Автоматический алгоритм тренировки настроен таким образом,

что при успешном выполнении диапазон изменений корректируется в сторону большей симметрии параметров. Диапазон выбранного параметра выставлялся автоматически, но при необходимости границы можно было отрегулировать вручную.

Важный момент — ни одному из пациентов не объясняли, что выполнение задания требует увеличения сгибания в коленном суставе.

Количество занятий в группе составило $10,8 \pm 5$ тренировок (от 4 до 22 сеансов). Длительность тренировки во многом зависела от текущего состояния пациента на момент её проведения. Решение о завершении каждой сессии определялось появлением признаков усталости (вегетативной симптоматики, одышки); частые ошибки при выполнении задания и невозможность их исправления являлись сигналами к завершению сеанса. Биомеханические признаки утомляемости выражались возрастанием асимметрии тренируемого параметра и снижением амплитуды сгибания коленных суставов. Для более точного наблюдения оператор мог видеть мгновенные значения основных биомеханических параметров. В среднем длительность тренировки составила $19,7 \pm 6,7$ (от 9 до 29,5) минуты.

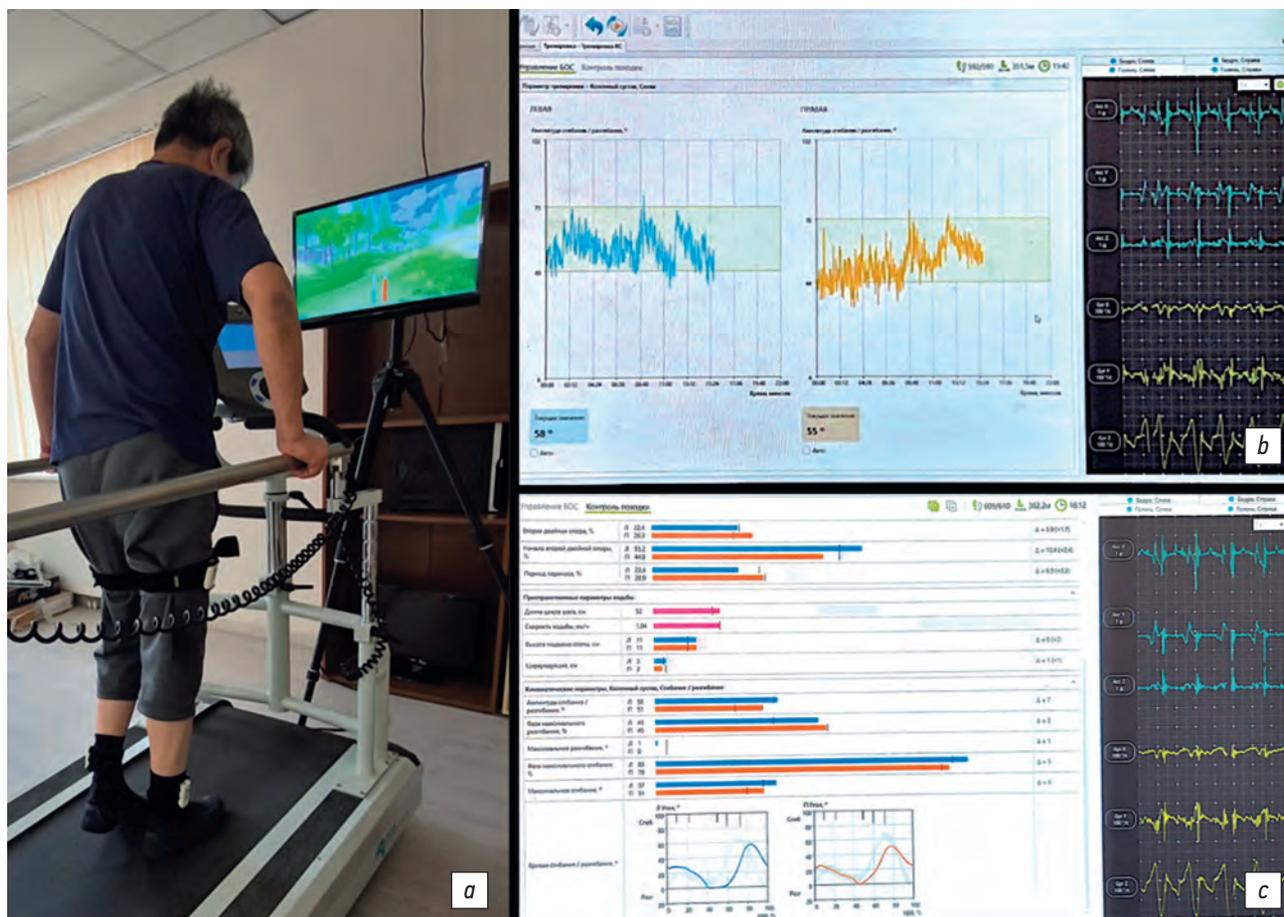


Рис. 3. БОС-тренировка: фото пациента во время тренировки (а); экран оператора, где отображаются графики изменения целевого параметра (б); мгновенные значения параметров ходьбы и гониограммы коленного сустава в реальном времени (с).

Fig. 3. Biofeedback training: photo of the patient during the training (a); the operator's screen displays graphs illustrating the changes in the target parameter (b); real-time instantaneous values of walking parameters and knee joint goniograms are presented (c).

Скорость ходьбы пациентов на тренировке изменялась согласно субъективным ощущениям пациентов и критериям безопасности проведения тренировки. Средняя скорость ходьбы пациентов составила $0,9 \pm 0,3$ км/ч (от 0,71 до 1,52).

Статистический анализ

Анализ полученных результатов проводили с использованием программного обеспечения Statistica 12.0. Верификацию возможного нормального распределения количественных параметров проводили с помощью критерия Шапиро–Уилка, показавшего, что распределение было отличным от нормального ($p < 0,05$). Данные представлены в виде значений медиан и квартилей 25% и 75%. Для внутригруппового сравнения полученных параметров использовали критерий Вилкоксона, для межгруппового сравнения — U-критерий Манна–Уитни. Статистически значимым считали значение $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Характеристика основной, сравнительной и контрольной групп представлена в табл. 1. Основная ($n=11$) и сравнительная ($n=11$) группы включали пациентов с гемипарезом в раннем восстановительном периоде после впервые возникшего полушарного ишемического инсульта. Основная группа имеет достоверное отличие от группы сравнения только по возрасту ($p < 0,05$).

Группа контроля ($n=34$) состояла из практически здоровых лиц, не имеющих в анамнезе неврологического дефицита и заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Основные результаты исследования

Результаты исследования динамики состояния по шкалам, оценивающим функцию ходьбы, представлены в табл. 2. После проведенного лечения наблюдалось

Таблица 1. Характеристика исследуемых групп

Table 1. Characteristics of the study groups

Параметр	Группа		
	Основная, $n=11$	Сравнения, $n=11$	Контроль, $n=34$
Пол:			
• мужской	8	9	18
• женский	3	2	16
Возраст, лет	44 [44; 57]*	59 [55; 62]	26 [24; 31]
Рост, м	1,72 [1,65; 1,85]	1,77 [1,72; 1,85]	1,72 [1,62; 1,74]
Масса тела, кг	75 [67; 90]	80 [71; 87]	59 [53; 67]
Полушарие:			
• правое	7	7	-
• левое	4	4	-
Число дней после инсульта	82 [43; 122]	76 [30; 105]	-

Примечание. * — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем в группе сравнения.

Note. * Significant with $p < 0.05$ compared with the value in the comparison group.

Таблица 2. Оценка по шкалам, оценивающим функцию ходьбы

Table 2. Score by gait assessment scales

Шкалы	Группа			
	Основная		Сравнения	
	до	после	до	после
Динамический индекс ходьбы (DGI)	11 [10; 17]	16 [13; 21]*	16 [14; 17]	19 [18; 20]*
Индекс Хаузера (HAI)	4 [3; 5]	3 [3; 4]*	4 [3; 4]	3 [3; 4]*
Встань и иди (TUG), сек	25 [15; 34]	20 [12; 30]*	32 [25; 36]	25 [19; 30]*
Тест 10-метровой ходьбы (10MWT), м/с	0,7 [0,43; 0,85]	0,87 [0,75; 1]*	0,75 [0,7; 0,8]	0,9 [0,85; 1]*

Примечание. * — $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем до лечения.

Note. * $p < 0.05$ compared with the pre-treatment value.

достоверное улучшение по всем используемым шкалам в обеих группах, при этом в точке до лечения и после лечения основная группа и группа сравнения не имели достоверных отличий ни по одному из параметров ($p > 0,05$).

Данные исследования динамики по шкале MRC и показатели реабилитационного диагноза в категориях Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ), оценивающих функцию ходьбы, представлены в табл. 3: между основной и сравнительной группами в точке до лечения и после лечения достоверные изменения отсутствуют ($p > 0,05$). Домены МКФ демонстрируют уменьшение активности проблем. Достоверное улучшение наблюдается в доменах d4500 (ходьба на короткие расстояния) и b770 (функция стереотипа походки) обеих групп.

Итоги анализа пространственно-временных и фазовых параметров ходьбы представлены в табл. 4. Первичное исследование данных основной группы обнаружило следующие изменения: при внутригрупповом сравнении на паретичной стороне выявлены снижение высоты подъёма стопы, более короткий ПО, более раннее начало ПОО и НВДО по сравнению с такими же показателями на контралатеральной стороне. При межгрупповом сравнении паретичной стороны с группой контроля выявлены увеличение ЦШ и ДО, более ранние ПОО и НВДО, снижение клиренса стопы. На контралатеральной стороне наблюдались удлинение ЦШ и ДО, продолжительный ПО и более позднее НВДО при анализе со значениями контрольной группы. По сравнению с группой контроля скорость пациентов была значительно ниже. Динамика

состояния основной группы в результате проведённого курса тренировок с БОС включала нижеперечисленные изменения: при внутригрупповом сравнении на паретичной конечности обнаружено укорочение ДО, снижение высоты подъёма стопы, более короткий ПО, более раннее начало ПОО и НВДО по сравнению с такими же данными на противоположной стороне. Сравнение с группой контроля выявило удлинение ЦШ и ДО, более ранние ПОО и НВДО, снижение клиренса стопы. На контралатеральной стороне выявлено снижение ПО и укорочение ДО после завершения занятий с БОС. При межгрупповом сравнении выявлены удлинение ЦШ и ДО, продолжительный ПО и более позднее НВДО контралатеральной стороны по сравнению с контрольной группой. Скорость пациентов остаётся низкой. При внутригрупповом анализе данных сравнительной группы обнаружено удлинение фазы ДО на паретичной стороне и её укорочение на противоположной стороне, а также увеличение скорости ходьбы после курса реабилитации ($p < 0,05$). При межгрупповой оценке параметров группы сравнения, полученных при первичной и заключительной диагностике, с аналогичными параметрами группы здоровых испытуемых выявлены следующие статистически значимые отличия: удлинение ЦШ на обеих сторонах в группе пациентов, увеличение ПО на контралатеральной стороне, увеличение ПОО на паретичной стороне, удлинение ПДО на обеих сторонах, более раннее НВДО на паретичной стороне и более позднее НВДО на противоположной стороне, снижение высоты подъёма стопы на паретичной стороне, а также значимое снижение скорости ходьбы

Таблица 3. Шкала MRC и домены Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья

Table 3. Medical Research Council Scale and Domains of the International Classification of Functioning, Disability and Health

Параметры	Группа			
	Основная		Сравнения	
	до	после	до	после
<i>Группа мышц</i>				
Тазобедренный, сгибатели	3 [3; 4]	3 [3; 4]	3 [3; 3,5]	3 [3; 4]
Тазобедренный, разгибатели	3 [3; 4]	3 [3; 4]	3 [3; 3,5]	3 [3; 4]
Коленный, сгибатели	3 [2; 4]	3 [2,5; 4]	3 [3; 3,5]	3 [3; 4]
Коленный, разгибатели	3 [2; 4]	3 [2,5; 4]	3 [3; 3,5]	3 [3; 4]
Голенистоопный, тыльные сгибатели	2 [2; 3]	2 [2; 3]	3 [2; 3]	3 [2; 3,5]
Голенистоопный, подошвенные сгибатели	2 [2; 3]	2 [2; 3]	3 [2; 3]	3 [2; 3,5]
<i>Домены Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья</i>				
b770 функция стереотипа походки	2 [2; 3]	2 [1; 2]*	2 [2; 3]	1 [1; 2]*
d4551 преодоление препятствий	2 [2; 2]	2 [1; 1]	2 [1; 2]	1 [1; 2]
d4500 ходьба на короткие расстояния	2 [2; 2]	1 [1; 1]*	2 [1; 2]	1 [0; 1]*
d4501 ходьба на дальние расстояния	3 [2; 3]	2 [2; 3]	2,5 [2; 3]	1,5 [0,8; 2]

Примечание. * — $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем до лечения.

Note. * $p < 0.05$ compared with the pre-treatment value.

Таблица 4. Пространственно-временные параметры и фазы ходьбы

Table 4. Spatial and temporal parameters and stages of walking

Параметры ходьбы	Группа				Контроль
	Основная		Сравнения		
	Конечность (до/после)				
	П	К	П	К	
ЦШ	1,5 [1,4; 2,1]# / 1,6 [1,3; 2,1]#	1,5 [1,4; 2,2]# / 1,6 [1,3; 2,1]#	1,6 [1,5; 2]# / 1,5 [1,4; 2]#	1,6 [1,4; 1,9]# / 1,5 [1,4; 2]#	1,1 [1,1; 1,2]
ВПС	10 [7; 11]#\$ / 11 [7; 14]#\$	14 [10; 15] / 12 [11; 15]	8 [7; 12]# / 9 [7; 12]#	13 [11; 15] / 14 [11; 14]	13,5 [12; 15]
V	1,8 [0,8; 2,9]# / 2 [0,9; 3,4]#		1,7 [1,2; 2,5]# / 2,2 [1,3; 2,4]*#		4,3 [4,1; 4,5]
ПО	65,5 [60,4; 73,6]# / 64,9 [59,9; 67,5]#	75,4 [70,8; 83,3]# / 73,6 [67,7; 80,3]*#	63,3 [60,8; 64,5] / 62,1 [59,9; 65]	74,2 [69,1; 78]# / 71,8 [67,9; 78,2]#	63,1 [62,4; 64,4]
ПОО	24,9 [16,4; 28,8]#\$ / 27,9 [18,9; 31,4]#\$	35 [26,9; 39,1] / 36,6 [32,6; 39,6]	26,3 [22,2; 31,2]# / 27,6 [21,5; 31,7]#	36,9 [35,9; 39,5] / 37,8 [35,2; 39,7]	36,9 [35,6; 37,9]
ДО	41,2 [30,4; 51,4]# / 36,8 [29,7; 44,6]*#	41 [30,3; 53,5]# / 37,3 [29,3; 45,3]*#	34,5 [30,6; 43]# / 35 [27,6; 40,8]*#	34,8 [30,7; 42,8]# / 34,4 [28,2; 41,4]*#	26,1 [24,6; 28,1]
НВДО	43,9 [38; 44,6]#\$ / 44,8 [39,1; 48,2]#\$	57,1 [53,6; 63,1]# / 56,7 [50,7; 61,5]#	41,6 [40,8; 45,8]# / 42,8 [40; 45,6]#	57,1 [53,5; 60]# / 56,4 [54,1; 60,1]#	49,9 [49,6; 50,3]

Примечание. * — $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем до лечения; # — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же значением в группе контроля; \$ — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем контралатеральной стороны. П — паретичная; К — контралатеральная; ЦШ — цикл шага; ВПС — высота подъёма стопы; V — скорость ходьбы; ПО — период опоры; ПОО — период одиночной опоры; ДО — суммарный период двойной опоры; НВДО — начало второй двойной опоры.

Note. *, $p < 0.05$ compared with the pre-treatment value; #, significant with a probability of $p < 0.05$ compared with the value in the control group; \$, significant with a probability of $p < 0.05$ compared with the same value on the contralateral side; П, parietic; К, contralateral; ЦШ, step cycle; ВПС, heel-rise height; V, walking speed; ПО, support phase; ПОО, single support phase; ДО, total double support phase; НВДО, second double-limb support phase.

в группе пациентов относительно группы контроля. Кинематические параметры для тазобедренного, коленного и голеностопного суставов представлены в табл. 5.

При первичном биомеханическом исследовании основной группы выявлены следующие статистически значимые различия кинематических параметров: Та1, Та2, Та3 и Ка3 паретичной стороны снижены по сравнению с аналогичными данными контралатеральной стороны. При межгрупповом сравнении с группой контроля до БОС-терапии установлено снижение Та1, Та2, Та3, Ка3, Га1, Га3 и увеличение Га4 паретичной конечности по сравнению с контрольной группой. На контралатеральной стороне такое же сравнение выявило снижение Та2, Га1, Га3 и увеличение Та3 и Га4. Выходная диагностика основной группы выявила следующие изменения кинематических параметров: по результатам внутригруппового сравнения после лечения отмечается увеличение Ка3, Га1, Га3 паретичной стороны. Параметры Та1, Та3 и Ка3 паретичной стороны остаются сниженными по сравнению с аналогичными данными противоположной стороны после реабилитации. При анализе данных паретичной стороны и значений группы контроля после занятий с БОС обнаружено снижение Та1, Та2, Та3, Ка3 и Га3 и увеличение Га4. Отмечено увеличение Га3 и Га4 контралатеральной стороны после курса занятий с БОС. Сравнение результатов контралатеральной стороны и группы контроля выявило снижение Та2 и увеличение Га4. При анализе данных группы сравнения после лечения выходная диагностика

демонстрировала увеличение Та2 и Га3 на контралатеральной стороне. Межгрупповое сравнение данных групп сравнения и контроля до курса реабилитации выявило следующие изменения: в тазобедренном суставе снижение Та1 на паретичной стороне, снижение Та2 на обеих сторонах, сниженное Та3 на паретичной и увеличенное Та3 на контралатеральной стороне. В коленном суставе сниженное Ка1, Ка2 и Ка3 на паретичной стороне. В голеностопном суставе сниженное Га3 и увеличенное Га4 с обеих сторон. Оценка тех же параметров группы сравнения, полученных при заключительном исследовании, с аналогичными параметрами группы контроля обнаружила следующие статистически значимые изменения: в тазобедренном суставе снижение Та1 на паретичной стороне, сниженное Та2 с обеих сторон, сниженное Та3 на паретичной стороне и увеличенное Та3 на контралатеральной стороне; в коленном суставе сниженные Ка1, Ка2 и Ка3 на паретичной стороне; в голеностопном суставе увеличение Га1 на паретичной стороне, снижение Га2 на паретичной стороне, уменьшение Га3 и увеличение Га4 с обеих сторон.

Увеличения маховой амплитуды Ка3 на паретичной стороне в группе сравнения не произошло ($p > 0,05$). Межгрупповое сравнение данных групп пациентов (основная и сравнения) выявило увеличение Ка1 и Ка2 паретичной стороны в основной группе после лечения.

ЭМГ-активность исследуемых мышц представлена в табл. 6. Биоэлектрическая активность мышц пациентов

Таблица 5. Параметры амплитуды движения суставов

Table 5. Parameters of joint range of motion

Сустав	Группа						Контроль
	Основная			Сравнения			
	Конечность (до/после)						
	П	К	П	К	П	К	
Тазобедренный сустав							
Ta1	16 [10; 21]# / 17 [13; 20]#	24 [20; 28] / 24 [18; 29]	15 [9; 16]# / 15 [10; 17]#	23 [19; 30] / 24 [20; 28]	23 [20; 25]		
Ta2	-5 [-9; 1]# / -7 [-10; -3]#	-8 [-11; -2]# / -4 [-12; -2]#	-6 [-9; 1]# / -8 [-11; -2]#	6 [-10; -3]# / -7 [-11; -3]#	-11 [-12; -9,5]		
Ta3	19 [15; 22]# / 17 [16; 23]#	28 [23; 33]# / 27 [23; 33]	16 [11; 28]# / 17 [16; 27]#	31 [26; 34]# / 31 [25; 32]#	24 [22; 27]		
Коленный сустав							
Ka1	17 [7; 26] / 16 [10; 22]&	20 [11; 24] / 21 [15; 24]	10 [4; 12]# / 10 [3; 11]#	14 [14; 20] / 16 [13; 19]	17 [14; 19]		
Ka2	4 [-1; 8] / 7 [-1; 11]&	8 [3; 11] / 11 [6; 12]	2 [-4; 9]# / -1 [-4; 2]#	6 [4; 9] / 5 [2; 11]	6 [4; 9]		
Ka3	39 [27; 54]# / 46 [27; 59]#	65 [49; 68] / 64 [56; 67]	35 [27; 52]# / 37 [30; 47]#	61 [56; 62] / 61 [59; 64]	63 [60; 67]		
Голенистоопный сустав							
Ga1	-6 [-8; -2] / -8 [-17; -6]*	-6 [-8; 0]# / -7 [-9; -4]	-11 [-14; -5] / -14 [-15; -13]#	-7 [-9; -4] / -7 [-10; -5]	-8 [-10; -6]		
Ga2	10 [6; 16] / 10 [7; 12]	13 [11; 14] / 12 [8; 13]	9 [5; 14] / 8 [5; 12]#	10 [9; 12] / 13 [10; 14]	12 [10; 15]		
Ga3	2 [-5; 3]# / -5 [-15; -1]*	-7 [-10; 0]# / -13 [-24; -7]*	-5 [-11; -3]# / -10 [-13; -7]#	-9 [-18; -7]# / -15 [-17; -12]#	-19 [-22; -15]		
Ga4	-4 [-8; -3]# / -9 [-16; -2]#	-7 [-9; 0]# / 8 [-12; -4]*	-9 [-11; -3]# / -9 [-14; -5]#	-4 [-10; -4]# / -6 [-9; -3]#	-1 [-3; 1]		

Примечание. * — $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем до лечения; # — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же значением в группе контроля; \$ — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем на контралатеральной стороне; & — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же значением в группе сравнения. П — паретичная; К — контралатеральная.

Note. * $p < 0.05$ compared with the same value before treatment; # significant with $p < 0.05$ compared with the value in the control group; \$ significant with $p < 0.05$ compared with the value on the contralateral side; & significant with $p < 0.05$ compared with the value in the comparison group. П, paretic; К, contralateral.

Таблица 6. Максимальные амплитуды электромиографического сигнала исследуемых мышц

Table 6. Maximum amplitude of the electromyographic signal of the study muscles

Сустав	Группа						Контроль
	Основная			Сравнения			
	Конечность (до/после)						
	П	К	П	К	П	К	
Мышцы голени							
TibA1	63 [13; 74]# / 57 [38; 105]#	143 [80; 178] / 151 [97; 164]	72 [33; 95]# / 69 [58; 135]#	163 [134; 230] / 208 [178; 278]#	159 [117,5; 186]		
TibA2	67 [34; 91]# / 57 [47; 101]#	113 [86; 160] / 126 [83; 230]	70 [58; 104]# / 71 [60; 139]#	143 [118; 215] / 180 [136; 222]	154 [115,5; 184,5]		
TriA	37 [32; 63]# / 55 [34; 97]#	141 [90; 172] / 163 [93; 209]	50 [27; 81]# / 70 [54; 96]#	145 [133; 163] / 171 [164; 208]*	154 [112,5; 202]		
Мышцы бедра							
QfA1	64 [46; 112] / 46 [32; 100]	78 [49; 118] / 88 [55; 99]	62 [41; 67] / 62 [52; 84]	92 [72; 109]# / 89 [67; 174]	63 [41; 86]		
QfA2	53 [23; 84]# / 41 [21; 96]	72 [45; 119] / 77 [42; 80]	40 [31; 58] / 48 [40; 81]	75 [60; 126]# / 82 [60; 116]	57 [38,5; 81]		
HmA	58 [38; 95]# / 70 [44; 97]#	150 [92; 190]# / 102 [86; 190]	53 [43; 71]# / 59 [40; 79]#	108 [83; 146] / 129 [115; 146]#	83 [61,5; 123]		

Примечание. * — $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем до лечения; # — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же значением в группе контроля; \$ — достоверно с вероятностью $p < 0,05$ по сравнению с таким же показателем контралатеральной стороны. П — паретичная; К — контралатеральная.

Note. * $p < 0.05$ compared with the pre-treatment value; # significant with $p < 0.05$ compared with the value in the control group; \$ significant with $p < 0.05$ compared with the same value on the contralateral side; П, paretic; К, contralateral.

основной группы на паретичной стороне демонстрировала снижение TibA1, TibA2, TriA, QfA2 и HmA до лечения по сравнению с аналогичными параметрами контралатеральной стороны. При межгрупповом сравнении с группой контроля отмечается снижение TibA, TriA и HmA паретичной конечности в начале курса, а пик активности HmA контралатеральной конечности увеличен по сравнению с нормой. Биоэлектрическая активность мышц после лечения демонстрирует следующее: на паретичной стороне выявлено снижение активности TibA1, TibA2, HmA и TriA при сопоставлении с данными противоположной стороны; сохраняется более низкая активность TibA1, TibA2, TriA в сравнении с группой контроля. При внутргрупповом сравнении профилей биоэлектрической активности мышц группы сравнения, полученных до и после курса реабилитации, обнаружено увеличение TriA с обеих сторон. При межгрупповом сравнении параметров активности мышц группы сравнения, полученных при первичном исследовании, с аналогичными параметрами группы контроля, выявлены следующие статистические значимые отличия: снижение TibA1, TibA2, TriA и HmA на паретичной стороне, увеличенное QfA1 и QfA2 на контралатеральной стороне. Аналогичное сравнение повторных данных группы сравнения с группой здоровых испытуемых обнаружило снижение TibA1, TibA2, TriA и HmA на паретичной стороне, увеличение TibA1 и HmA на противоположной стороне.

ОБСУЖДЕНИЕ

Клиническая оценка по используемым шкалам, как и два домена МКФ, показали достоверное улучшение состояния ходьбы у пациентов. Шкала MRC не показала достоверных изменений. Эта картина практически полностью соответствует таковой в нашей предшествующей

работе, по результатам которой обнаружено улучшение по всем мышечным группам в виде увеличения мышечной силы, однако достоверные изменения также отсутствуют [21].

Пространственно-временные параметры соответствуют такому для данной стадии инсульта, что подтверждается ранее выполненными исследованиями [22, 23].

Из фазовых характеристик в результате лечения достоверно снизилось значение периода опоры на контралатеральной стороне и уменьшилась величина суммарного периода двойной опоры. Оба изменения являются результатом положительной динамики в ходе реабилитации. Снижение значения периода опоры на здоровой стороне — это пусть незначительное, но уменьшение необходимости компенсировать сторону пареза, которой сложно нести необходимую нагрузку, в том числе и по времени. Снижение значения периода двойной опоры — тоже положительный симптом, свидетельствующий о возрастании функциональной возможности паретичной конечности. По сути, если цикл шага одинаков, то это один параметр. Несущественные отличия значений слева и справа являются результатом статистической обработки. Само же снижение параметра двойной опоры есть результат улучшения функции равновесия при ходьбе.

Исследование движений в суставах нижних конечностей обнаружило достоверное увеличение маховой амплитуды коленного сустава на стороне пареза в основной группе. Именно эта амплитуда и была целью проводимой БОС-тренировки. Таким образом, проводимое воздействие оказалось эффективным. Графики гониограмм движений коленных суставов контралатеральной и паретичной конечностей приведены на рис. 4. Визуально определяются изменения, развившиеся в результате

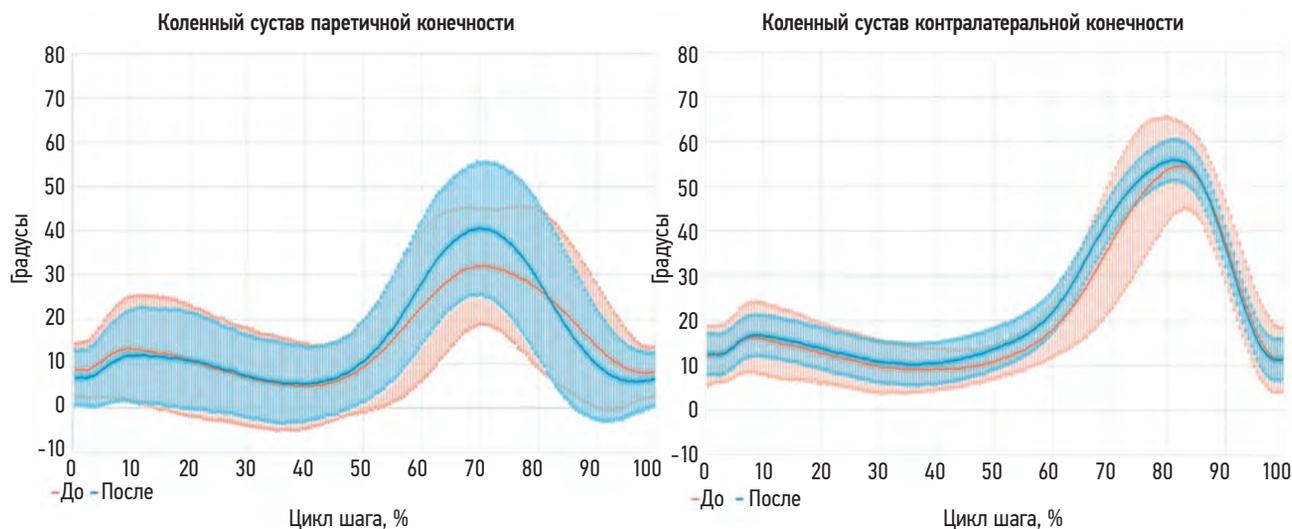


Рис. 4. Гониограммы движений коленных суставов.

Fig. 4. Goniograms of knee joint movements.

занятий, причём только на стороне пареза. Благодаря возросшей амплитуде сгибания коленного сустава паретичной стороны и стабильности контралатеральной стороны уменьшилась асимметрия движения. В группе сравнения достоверного увеличения маховой амплитуды (КаЗ) не произошло.

Аналогичные работы по изучению влияния биологической обратной связи на амплитуду коленного сустава в реабилитации после центрального гемипареза при инсульте проводились в 90-х годах прошлого века. Основной целью всех проводимых исследований было увеличение амплитуды сгибания коленного сустава, снижение которой часто вызвано его переразгибанием в момент опоры. Преимущественно исследования выполнялись с помощью звукового сигнала и электрогониометра, закреплённого на нижних конечностях. При переразгибании колена в ходьбе, фиксируемом электрогониометром, пациент слышал звук, сигнализирующий об ошибке. В работе R.E. Nogue и соавт. [17] все пациенты продемонстрировали положительный результат применения данного метода. Сигнал, возникающий при 0° разгибания, давал подсказку об ошибке, которую необходимо было исправить. Освоение и правильное выполнение задания способствовало контролю рекурвации (избыточное разгибание) колена в ходе обучения. В исследованиях групп N. Basaglia [19] и E. Ceceli [20] с помощью схожего метода тренировки также отмечены эффективность и сохранение полученного результата в течение длительного периода. Результаты исследования M.E. Morris и соавт. [18] свидетельствуют о повышении эффективности традиционных методов реабилитации при дополнительном воздействии эдектрогониометрической обратной связи по сравнению с результатами контрольной группы. Однако более свежих результатов в литературе не обнаружено, несмотря на перспективность и эффективность использования такого лечения при инсульте.

Реабилитация с помощью визуальной обратной связи активно распространена в связи с внедрением широкого спектра оборудования, которое стало доступным реабилитационным учреждениям. В материалах статьи A.N. Marshall и соавт. [24] продемонстрирован результат тренировки при медиальном смещении колена у спортсменов. После проведения одного сеанса с помощью визуальной обратной связи выявлено улучшение сгибания колена во время выполнения упражнения и уменьшение его отведения по сравнению с результатами контрольной группы. Визуально-моторная адаптация с помощью стробоскопических очков во время тренировки может увеличить сгибание колена во время прыжка у спортсменов после повреждения передней крестообразной связки [25], что объясняется влиянием зрительного контроля движения повреждённого сустава, свидетельствующем о важности визуальной обратной связи в целом. В работе N. Oliveira и соавт. [26] описан результат переобучения ходьбе у детей и подростков с нарушением сгибания

колена с использованием визуальной обратной связи. Данные многообещающие и противоречивые, однако тренировка по амплитуде в одном коленном суставе может сильно повлиять на другие суставы [26]. В систематическом обзоре Y.J. Xie и соавт. [27] представлены результаты, оценивающие эффект ЭМГ-биологической обратной связи после любой операции на колене. Авторы пришли к выводу, что ЭМГ-биоуправление может улучшить амплитуду движений коленного сустава у пациентов, перенёвших хирургическое вмешательство.

Все вышеперечисленные методы не являются прямым аналогом исследуемого материала в данной работе. Но это всё, что имеется в доступной литературе. Вероятно, отсутствие прямых аналогичных работ, посвящённых целевому увеличению амплитуды движений в коленном суставе паретичной конечности — результат отсутствия технической возможности таких исследований. По этой причине провести прямое сравнение не представляется возможным.

Увеличение двух амплитуд голеностопного сустава паретичной и контралатеральной сторон мы можем интерпретировать как побочный результат возросшей активности паретичной стороны.

В целом по суставам незначительно уменьшились отклонения параметров паретичной и контралатеральной стороны после курса БОС-тренировок. Все изменения имеют относительно невысокую степень и не преобразовывают ходьбу пациентов качественно, что преждевременно ожидать у данного контингента пациентов, однако очевидное улучшение не вызывает сомнений.

Изменения мышечной активности также носят типичный характер — снижение на стороне пареза и незначительную гиперфункцию (hamstring) на контралатеральной. Аналогичные изменения были описаны ранее [28, 29], при этом достоверных изменений активности мышц в результате лечения авторами не наблюдалось.

Во время проведения исследования отмечен ряд особенностей. Когнитивные нарушения даже лёгкой степени иногда мешали полному и быстрому пониманию задания. Необходимость повторного объяснения требовала дополнительного времени и терпения пациента. Из-за своего уязвимого состояния не все пациенты при неправильном выполнении задания относились к трудностям и возникающим ошибкам спокойно и адекватно, что снижало их общую мотивацию при тренировках и дальнейшей реабилитации; также мы столкнулись с языковым барьером в отношении иностранных пациентов, однако с помощью вербальных знаков и подсказок на экране нам удалось выстроить тренировки более логичным и понятным способом. Ещё одним из моментов, требующих особого внимания, являлось неумение некоторых пациентов ходить по тредмилу, несмотря на отсутствие страха и безопасную ходьбу по полу. Появилась необходимость большего контроля при тренировке с такими пациентами во избежание падения и травм.

Ограничения исследования

Проведённое исследование имеет ряд ограничений. Так, малый размер выборки пациентов не позволяет широко экстраполировать результаты. При отборе пациентов не учитывались тип двигательных нарушений и вариант функционирования коленного сустава, что могло оказать влияние на эффективность данной методики. Кроме этого, мы не имели возможности применять только БОС-тренировку, поэтому все пациенты получали реабилитационные назначения в соответствии с действующими стандартами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об эффективности метода биологической обратной связи для восстановления амплитуды сгибания коленного сустава у пациентов в раннем восстановительном периоде после ишемического инсульта. Помимо значения целевого параметра, удалось увеличить опороспособность паретичной конечности и её функциональные возможности, что способствовало уменьшению асимметрии шага, большей выносливости и безопасности пациента при ходьбе. Дополнительно изменилась амплитуда движения голеностопного сустава. Несмотря на достоверные изменения махового сгибания колена, стереотип походки больных только за счёт этого фактора не мог измениться существенно.

Полученные нами результаты подтверждают эффективность метода БОС в реабилитации постинсультных нарушений при средней длительности тренировки в течение 20 минут на протяжении 10 дней госпитализации. Метод БОС-тренировки является неинвазивным, немедикаментозным и практически не имеет противопоказаний, что позволяет рекомендовать его в раннем восстановительном периоде после церебрального инсульта.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.В. Скворцов — дизайн исследования, поиск и обработка литературы, написание рукописи; А.Р. Худайгулова — поиск и обработка литературы, написание рукописи, проведение исследования, обработка данных; С.Н. Кауркин — проведение исследования, дизайн исследования; Н.В. Гребенкина — проведение исследования, обработка данных; Г.Е. Иванова — общее руководство, дизайн

исследования. 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 ФГБУ ФЦМН ФМБА России (протокол № 7 от 19.07.2021). Все участники исследования подписали форму информированного добровольно согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ФМБА России (НИР «Разработка новых технологий медицинской реабилитации у пациентов с поражениями и заболеваниями головного мозга»), ААААА19-119042590030-2.

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 проведении исследования и 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, данные могут быть опубликованы в открытом доступе.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. D.V. Skvortsov: conceptualization, resources, writing — original draft; A.R. Khudaygulova: resources, writing — original draft, investigation, formal analysis; S.N. Kaurkin: investigation, conceptualization; N.B. Grebenkina: investigation, formal analysis; G.E. Ivanova: supervision, conceptualization. All authors approved the final version of the manuscript for publication 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 Federal Center of Brain Research and Neurotechnology (Protocol No. 7 dated July 19, 2021). All study participants signed an informed consent form prior to inclusion in the study.

Funding sources. The work was performed as part of state assignment of the Federal Medical and Biological Agency of Russia Development of New Technologies for Medical Rehabilitation in Patients with Brain Lesions and Diseases — ААААА19-119042590030-2.

Disclosure of interests. The author declares no relationships, activities, or interests over the past three years with any third parties (commercial or non-commercial) that could be affected by the content of this 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, data can be published as open access.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- World Stroke Organization. *Impact of stroke*. Available at: <https://www.world-stroke.org/world-stroke-day-campaign/about-stroke/impact-of-stroke>
- Rathore SS, Hinn AR, Cooper LS, et al. Characterization of incident stroke signs and symptoms: Findings from the atherosclerosis risk in communities study. *Stroke*. 2002;33(11):2718–2721. doi: 10.1161/01.str.0000035286.87503.31
- Burpee JL, Lewek MD. Biomechanical gait characteristics of naturally occurring unsuccessful foot clearance during swing in individuals with chronic stroke. *Clin Biomech (Bristol)*. 2015;30(10):1102–1107. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2015.08.018
- Lee J, Lee RK, Seamon BA, et al. Between-limb difference in peak knee flexion angle can identify persons post-stroke

- with Stiff-Knee gait. *Clin Biomech (Bristol)*. 2024;120:106351. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2024.106351
5. Bleyenheuft C, Bleyenheuft Y, Hanson P, Deltombe T. Treatment of genu recurvatum in hemiparetic adult patients: A systematic literature review. *Ann Phys Rehabil Med*. 2010;53(3):189–199. doi: 10.1016/j.rehab.2010.01.001
6. Skvortsov DV. *Diagnostics of motor pathology by instrumental methods: Gait analysis, stabilometry*. Moscow; 2007. P. 273. (In Russ.) EDN: QLQAIN
7. Tenniglo MJ, Buurke JH, Zeegers AV et al. The effect of rectus femoris transfer on kinematics and functional outcomes in adult stroke patients walking with a stiff knee gait. *Gait Posture*. 2024;114:101–107. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.08.001
8. De Miguel Fernandez J, Rey-Prieto M, Rio MS, et al. Adapted assistance and resistance training with a knee exoskeleton after stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2023;31:3265–3274. doi: 10.1109/TNSRE.2023.3303777
9. Lora-Millan JS, Sanchez-Cuesta FJ, Romero JP, et al. A unilateral robotic knee exoskeleton to assess the role of natural gait assistance in hemiparetic patients. *J Neuroeng Rehabil*. 2022;19(1):109. doi: 10.1186/s12984-022-01088-2
10. Bae DY, Shin JH, Kim JS. Effects of dorsiflexor functional electrical stimulation compared to an ankle/foot orthosis on stroke-related genu recurvatum gait. *J Phys Ther Sci*. 2019;31(11):865–868. doi: 10.1589/jpts.31.865
11. Fujita K, Kobayashi Y, Miaki H, et al. Pedaling improves gait ability of hemiparetic patients with stiff-knee gait: Fall prevention during gait. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2020;29(9):105035. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105035
12. Dalal KK, Joshua AM, Nayak A, et al. Effectiveness of prowling with proprioceptive training on knee hyperextension among stroke subjects using videographic observation: A randomised controlled trial. *Gait Posture*. 2018;61:232–237. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.01.018
13. Guo C, Mi X, Liu S, et al. Whole body vibration training improves walking performance of stroke patients with knee hyperextension: A randomized controlled pilot study. *CNS Neurol Disord Drug Targets*. 2015;14(9):1110–1115. doi: 10.2174/1871527315666151111124937
14. Boudarham J, Zory R, Genet F, et al. Effects of a knee-ankle-foot orthosis on gait biomechanical characteristics of paretic and non-paretic limbs in hemiplegic patients with genu recurvatum. *Clin Biomech (Bristol)*. 2013;28(1):73–78. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2012.09.007
15. Portnoy S, Frechtel A, Raveh E, Schwartz I. Prevention of genu recurvatum in poststroke patients using a hinged soft knee orthosis. *PM R*. 2015;7(10):1042–1051. doi: 10.1016/j.pmrj.2015.04.007
16. Geerars M, Minnaar-van der Feen N, Huisstede BM. Treatment of knee hyperextension in post-stroke gait. A systematic review. *Gait Posture*. 2022;91:137–148. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.08.016
17. Hogue RE, McCandless S. Genu recurvatum: Auditory biofeedback treatment for adult patients with stroke or head injuries. *Arch Phys Med Rehabil*. 1983;64(8):368–370.
18. Morris ME, Matyas TA, Bach TM, Goldie PA. Electrogoniometric feedback: Its effect on genu recurvatum in stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 1992;73(12):1147–1154.
19. Basaglia N, Mazzini N, Boldrini P, et al. Biofeedback treatment of genu-recurvatum using an electrogoniometric device with an acoustic signal. One-year follow-up. *Scand J Rehabil Med*. 1989;21(3):125–130.
20. Ceceli E, Dursun E, Çakıcı A. Comparison of joint-position biofeedback and conventional therapy methods in Genu recurvatum after stroke: 6 months' follow-up. *Eur J Phys Med Rehab*. 1996;6:141–144.
21. Skvortsov DV, Kaurkin SN, Ivanova GE, et al. Effectiveness of gait training with electromyogram in stroke patients: An experimental longitudinal pilot study. *Bulletin of rehabilitation medicine*. 2025;24(1):8–18. doi: 10.38025/2078-1962-2025-24-1-8-18 EDN: OINUFV
22. Patterson KK, Gage WH, Brooks D, et al. Evaluation of gait symmetry after stroke: A comparison of current methods and recommendations for standardization. *Gait Posture*. 2010;31(2):241–246. doi: 10.1016/j.gaitpost.2009.10.014
23. Chen G, Patten C, Kothari DH, Zajac FE. Gait differences between individuals with post-stroke hemiparesis and non-disabled controls at matched speeds. *Gait Posture*. 2005;22(1):51–56. doi: 10.1016/j.gaitpost.2004.06.009
24. Marshall AN, Hertel J, Hart JM, et al. Visual biofeedback and changes in lower extremity kinematics in individuals with medial knee displacement. *J Athl Train*. 2020;55(3):255–264. doi: 10.4085/1062-6050-383-18
25. Grooms DR, Chaudhari A, Page SJ, et al. Visual-motor control of drop landing after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Athl Train*. 2018;53(5):486–496. doi: 10.4085/1062-6050-178-16
26. Oliveira N, Ehrenberg N, Cheng J, et al. Visual kinematic feedback enhances the execution of a novel knee flexion gait pattern in children and adolescents. *Gait Posture*. 2019;74:94–101. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.06.016
27. Xie YJ, Wang S, Gong QJ, et al. Effects of electromyography biofeedback for patients after knee surgery: A systematic review and meta-analysis. *J Biomech*. 2021;120:110386. doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110386
28. Mohan DM, Khandoker AH, Wasti SA, et al. Assessment methods of post-stroke gait: A scoping review of technology-driven approaches to gait characterization and analysis. *Front Neurol*. 2021;12:650024. doi: 10.3389/fneur.2021.650024
29. Srivastava S, Patten C, Kautz SA. Altered muscle activation patterns (AMAP): An analytical tool to compare muscle activity patterns of hemiparetic gait with a normative profile. *J Neuroeng Rehabil*. 2019;16(1):21. doi: 10.1186/s12984-019-0487-y

ОБ АВТОРАХ

* Худайгулова Алия Раисовна;

адрес: Россия, 117513, Москва, ул. Островитянова, д. 1;

ORCID: 0009-0008-4367-567X;

eLibrary SPIN: 1116-1915;

e-mail: lady.aliya1998@gmail.com

Скворцов Дмитрий Владимирович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-2794-4912;

eLibrary SPIN: 6274-4448;

e-mail: dskvorts63@mail.ru

Куркин Сергей Николаевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-5232-7740;

eLibrary SPIN: 4986-3575;

e-mail: kaurkins@bk.ru

AUTHORS' INFO

* Aliya R. Khudaigulova;

address: 1 Ostrovityanova st, Moscow, Russia, 117513;

ORCID: 0009-0008-4367-567X;

eLibrary SPIN: 1116-1915;

e-mail: lady.aliya1998@gmail.com

Dmitry V. Skvortsov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-2794-4912;

eLibrary SPIN: 6274-4448;

e-mail: dskvorts63@mail.ru

Sergey N. Kaurkin, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-5232-7740;

eLibrary SPIN: 4986-3575;

e-mail: kaurkins@bk.ru

Гребенкина Наталья Вячеславовна;

ORCID: 0000-0002-8441-2285;

eLibrary SPIN: 6621-3836;

e-mail: grebenkina_nv@rsmu.ru

Иванова Галина Евгеньевна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-3180-5525;

eLibrary SPIN: 4049-4581;

e-mail: reabilivanova@mail.ru

Natalya V. Grebenkina;

ORCID: 0000-0002-8441-2285;

eLibrary SPIN: 6621-3836;

e-mail: grebenkina_nv@rsmu.ru

Galina E. Ivanova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0003-3180-5525;

eLibrary SPIN: 4049-4581;

e-mail: reabilivanova@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab676919>

EDN: ZNEWAA

Лечение спастического синдрома в программе комплексной реабилитации детей с позвоночно-спинномозговой травмой

О.В. Попова¹, И.Н. Новосёлова^{1, 2}, И.В. Пони́на¹, Е.А. Львова¹, С.В. Мещеряков¹,
С.А. Валиуллина¹

¹ Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошала, Москва, Россия;

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Позвоночно-спинномозговая травма на сегодняшний день представляет собой серьёзную проблему. У 60–78% пациентов уровень жизни ухудшается с появлением спастико-болевого синдрома, лечение которого требует комплексного подхода.

Цель исследования — оценить коррекцию спастико-болевого синдрома у детей с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы в программе комплексной реабилитации.

Методы. В исследовании приняли участие 23 ребёнка в возрасте от 10 до 17 лет включительно с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы, поступившие в НИИ неотложной детской хирургии и травматологии. Реабилитация по разработанной методике проводилась на протяжении 6 месяцев: в ранний (от 3 суток до 4 месяцев), промежуточный (от 1 до 3 месяцев) и восстановительный (после 3 месяцев) периоды. Для определения неврологического дефицита применялась шкала ASIA (оценка повреждений при травме спинного мозга), для оценки спастического синдрома — шкалы Эшфорта и Тардье, инструментальный тест с маятником. Для оценки мышечной силы использовалась модифицированная шкала Рэнкина (шкала MRS), для оценки функциональной активности в повседневной жизни — шкала SCIM III, для оценки психоэмоционального статуса пациентов — методика Спилбергера–Ханина, шкала депрессии Бека, госпитальная шкала HADS. Оценка выраженности болевого синдрома проводилась по визуальной аналоговой шкале боли (ВАШ) для детей от 8 лет и старше.

Результаты. Использование комплексной программы реабилитации детей с индивидуальным режимом позиционирования и ортезирования, нутритивной поддержкой, медикаментозной терапией спазмолитиками, анальгетиками и адьювантами, а также преформированных физических факторов и современной лечебной гимнастики с постепенным расширением режима двигательной нагрузки и механотерапией на локомоторных роботизированных комплексах, в том числе с психологическим сопровождением пациента и его семьи, показало достоверный положительный клинический эффект у большинства пациентов со спастическим синдромом разной степени выраженности.

Заключение. В последнее десятилетие для лечения спастического синдрома активно применяется роботизированная терапия. Наиболее изученными и перспективными являются роботизированные комплексы Erigo и Lokomat. Использование комплексной программы реабилитации у детей с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы со спастическим синдромом показало достоверный положительный клинический эффект.

Ключевые слова: позвоночно-спинномозговая травма; ПСМТ; повреждение спинного мозга; спастический синдром; болевой синдром; комплексная медицинская реабилитация; роботизированная механотерапия.

Как цитировать:

Попова О.В., Новосёлова И.Н., Пони́на И.В., Львова Е.А., Мещеряков С.В., Валиуллина С.А. Лечение спастического синдрома в программе комплексной реабилитации детей с позвоночно-спинномозговой травмой // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 125–133. DOI: 10.36425/rehab676919 EDN: ZNEWAA

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab676919>

EDN: ZNEWAA

Treatment of Spasticity as Part of Comprehensive Rehabilitation Program for Children with Spinal Cord Injuries

Olga V. Popova¹, Irina N. Novoselova^{1, 2}, Irina V. Ponina¹, Ekaterina A. Lvova¹,
Semen V. Meshcheryakov¹, Svetlana A. Valiullina¹

¹ Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma — Dr. Roshal's Clinic, Moscow, Russia;

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Spinal cord injury is a pressing healthcare concern. The quality of life for 60%–78% of patients declines when spastic pain develops, and they require comprehensive treatment.

AIM: The study aimed to evaluate spastic pain treatment as part of a comprehensive rehabilitation program for children with spinal cord injury sequelae.

METHODS: The study included 23 children aged ≥ 10 years to ≤ 17 years with spinal cord injury sequelae, who were admitted to the Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Traumatology. The local rehabilitation program lasted 6 months and was divided into three phases: early (3 days to 4 months), intermediate (1 to 3 months), and recovery (after 3 months). The American Spinal Injury Association Impairment Scale was used to evaluate neurological deficits in spinal cord injury. The Ashworth and Tardieu scales, as well as the Pendulum Test, were used to assess spasticity. The Modified Rankin Scale was used to evaluate muscle strength. The Spinal Cord Independence Measure, Version III, was used to evaluate functional independence measure in performing everyday activities. The State-Trait Anxiety Inventory, the Beck Depression Inventory, and the Hospital Anxiety and Depression Scale were used to evaluate the psychoemotional status of patients. The pain severity was assessed using a visual analog pain scale for children aged ≥ 8 years.

RESULTS: A comprehensive rehabilitation program produced reliable positive clinical outcomes for most patients with varying degrees of spasticity. The program included personalized positioning and orthotic regimens, nutritional support, pharmacological support with antispasmodics, analgesics, and adjuvants, preformed physical factors, advanced training with gradual increases in motor load, robotic-assisted locomotor training, and psychological support for patients and their families.

CONCLUSION: In recent years, robotic treatment has become a prevalent treatment option for spasticity. Erigo and Lokomat are the most well-known and promising robot-assisted rehabilitation devices. A comprehensive rehabilitation program reliably produces positive clinical results for children with sequelae of spinal cord injuries and spasticity.

Keywords: spinal cord injury; SCI; spinal cord damage; spastic syndrome; pain syndrome; complex medical rehabilitation; robotic mechanotherapy.

To cite this article:

Popova OV, Novoselova IN, Ponina IV, Lvova EA, Meshcheryakov SV, Valiullina SA. Treatment of Spasticity as Part of Comprehensive Rehabilitation Program for Children with Spinal Cord Injuries. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):125–133. DOI: 10.36425/rehab676919
EDN: ZNEWAA

Список сокращений

ВАШ — визуальная аналоговая шкала боли

ПСМТ — позвоночно-спинномозговая травма

ASIA (American Spinal Injury Association) — шкала повреждений при травме спинного мозга

Ashworth Scale — шкала Эшворта для оценки мышечной спастичности

BDI (Beck Depression Inventory) — шкала депрессии Бека для выявления симптомов депрессии и степени их выраженности

HADS (Hospital Anxiety and Depression Scale) — госпитальная шкала тревоги и депрессии

mRS (Modified Rankin Scale) — модифицированная шкала Рэнкина для оценки степени инвалидности и зависимости в повседневной жизни лица, перенёсшего инсульт или другие неврологические нарушения

SCIM III (Spinal Cord Independence Measure III) — измеритель независимости при повреждениях спинного мозга, версия 3

Tardieu Scale — шкала Тардые для измерения спастичности у пациентов с неврологическими заболеваниями

ОБОСНОВАНИЕ

В настоящее время позвоночно-спинномозговая травма (ПСМТ) представляет собой серьёзную проблему, требующую детального рассмотрения, в частности в таких областях медицины, как нейрохирургия, нейрореабилитация и травматология. Актуальность подтверждается статистическими данными, в соответствии с которыми инвалидность при ПСМТ наступает в пределах 57,5–96%, а в некоторых случаях может достигать и 100% [1].

У пациентов с ПСМТ выше поясничного утолщения наиболее распространёнными последствиями являются спастический и болевой синдромы, которые выявляются в 60–78% случаев [2].

Тенденция мышц оставаться продолжительное время в укороченном состоянии способствует уменьшению гибкости, потере эластичности, уплотнению и фиброзу и, в конечном итоге, приводит к развитию мышечных контрактур. Часто синдром верхнего мотонейрона помимо спастики проявляется сенсорными расстройствами, причём острая боль купируется на ранних этапах восстановления, а инвалидизирующим осложнением ПСМТ является хроническая боль, которой страдают до 80% пациентов [3]. Для детей это особенно актуально, поскольку отдалённые последствия спастико-болевого синдрома ухудшают интеграцию ребёнка в общество и, таким образом, социализацию всей семьи. Обеспечение условий для физического и психического роста и развития ребёнка — одна из важнейших задач реабилитации [4].

Лечение спастико-болевого синдрома необходимо проводить в рамках комплексной программы реабилитации, поскольку синдром является всего лишь одним из последствий ПСМТ, и его проявления зависят от других возможных последствий и осложнений течения травмы. При средней выраженности спастического синдрома применяется консервативная терапия, которая заключается

в медикаментозном лечении, правильном позиционировании, назначении лечебной физкультуры и преформированных физических факторов, а также в психолого-психиатрическом сопровождении вследствие развившейся психопатологической симптоматики [5]. Стоит отметить, что адекватная медикаментозная терапия у детей осложняется противопоказанием к назначению в возрасте моложе 18 лет и отсутствием у некоторых антиспастических средств регистрации на территории Российской Федерации, в связи с чем назначение большинства препаратов осуществляется врачебной комиссией не по официальным рекомендациям, а off-label [6]. Для предотвращения или минимизации проблем психологической дезадаптации, а также с целью недопущения развития психопатологических осложнений ребёнку должна быть доступна ранняя психологическая и психиатрическая помощь [7–9].

В последнее десятилетие для лечения спастического синдрома активно применяется роботизированная терапия, при этом наиболее изученными являются роботизированные комплексы Erigo (стол-вертикализатор) и Lokomat (комплекс для восстановления навыков ходьбы). Стремительно растёт количество исследований, оценивающих эффективность роботизированной механотерапии в восстановлении двигательной функции по сравнению с применением традиционной лечебной физкультуры, кинезитерапевтических методик и мануальных навыков. Несмотря на неоднозначные результаты, продемонстрированные ассистирующими роботами, метод является одним из перспективных направлений нейрореабилитации [10] и требует дальнейшего систематического накопления и анализа научных фактов, в частности в коррекции спастического синдрома у детей с последствиями ПСМТ.

Цель исследования — оценить коррекцию спастико-болевого синдрома у детей с последствиями ПСМТ в программе комплексной реабилитации.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование интервенционное одноцентровое выборочное неконтролируемое. Тип экспериментального исследования — неослепленное нерандомизированное.

В исследование включены 23 ребёнка (от 10 до 17 лет включительно), поступившие в ГБУЗ «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошалья» Департамента здравоохранения г. Москвы (ГБУЗ НИИ НДХИТ — Клиника доктора Рошалья) с 2018 года. Реабилитация по разработанной методике проводилась на протяжении 6 месяцев: в ранний (от 3 суток до 4 месяцев), промежуточный (от 1 до 3 месяцев) и восстановительный (после 3 месяцев) периоды. Для диагностики актуального состояния проводился клинический осмотр со стандартной неврологической оценкой повреждений спинного мозга, оценкой мышечной силы, исследованием показателей независимости в повседневной жизни, а также изучением особенностей психологического статуса и детско-родительских отношений. Каждому пациенту был разработан индивидуальный режим позиционирования и ортезирования, назначены медикаментозная терапия спазмолитиками центрального, цереброспинального или спинального уровня действия, анальгетиками и адьювантами, преформированные физические факторы и лечебная гимнастика, включающая применение современных кинезитерапевтических методик. Расширение режима двигательной нагрузки происходило постепенно в течение курса реабилитации и корректировалось в соответствии с толерантностью к физической нагрузке, оценённой с помощью эргоспирометрии. Всем пациентам в процессе реабилитации была назначена проградцентная (с наращиванием объёма) механотерапия — от имитатора опорной нагрузки и педального тренажёра до локомоторных роботизированных комплексов с биологической обратной связью EriGo и Lokomat. Оценка результатов проводилась через 6 месяцев после травмы.

Критерии соответствия

Критерии включения: возраст от 10 до 17 лет (включительно); наличие ПСМТ, подтверждённой клиническими и лучевыми методами обследования; ранний (от 3 суток до 4 недель), промежуточный (от 1 до 3 месяцев) и восстановительный (после 3 месяцев) период травмы; добровольное информированное согласие пациента или родителей (опекунов) на участие в научном исследовании.

Критерии не включения: дети до 10 лет; наличие ПСМТ на уровне поясничного отдела.

Условия проведения

Исследование проведено в ГБУЗ НИИ НДХИТ — Клиника доктора Рошалья.

Продолжительность исследования

Исследование проведено в период с января 2018 по июнь 2024 года.

Описание медицинского вмешательства

Реабилитационные мероприятия проводились сразу после поступления пациентов в стационар и были направлены на профилактику вторичных осложнений, которые могут провоцировать спастический и болевой синдромы.

Программа реабилитации включала обучение родителей (опекунов) пациентов правильному позиционированию и ортезированию (обучение проводилось по 1,5 часа 3 раза в сутки), а также вертикализации на поворотном столе, начиная с угла подъёма 30°. Ортезирование нижних конечностей проводилось подробно с целью уменьшения вероятности формирования патологической установки. Лечебная гимнастика начиналась с пассивных упражнений, с постепенным переходом на пассивно-активные, а затем активные. Двигательный режим расширялся постепенно для профилактики переутомления и усиления спастического синдрома. Далее в лечебную гимнастику вводились общеразвивающие упражнения на воспитание общей и силовой выносливости аксиальной мускулатуры с использованием внешнего отягощения, затем двигательная нагрузка увеличивалась за счёт специальных упражнений для восстановления естественных движений или формирования энергетически эффективных компенсаторных локомоторных механизмов и интеграции их в повседневную двигательную активность.

Механотерапия для уменьшения спастического синдрома начиналась с афферентной стимуляции подошвенным имитатором опорной нагрузки «Корвит» (Центр авиакосмической медицины, Россия), затем назначалась пассивная и активно-пассивная тренировка верхних и нижних конечностей с помощью педального тренажёра с электродвигателем и локомоторная тренировка на тренажёре EriGo (Носота, Швейцария). После вертикализации пациента до угла 80° и при отсутствии ортостатических приступов можно было перейти к введению в программу реабилитации роботизированных тренажёров с биологической обратной связью (БОС), ремодулирующих локомоторный акт ходьбы (Lokomat, Носота, Швейцария).

В план комплексных реабилитационных мероприятий входило и назначение преформированных физических факторов (аппаратная физиотерапия) в зависимости от синдромакомплекса нарушений, присущего конкретному пациенту.

С первого дня реабилитации пациента и его семью сопровождал медицинский психолог, в задачи которого входили диагностика и коррекция посттравматического стрессового расстройства, формирование внутренней картины болезни на всех уровнях и семейная реабилитация. В случае необходимости в программу комплексной

реабилитации входила и консультация нейропсихиатра, задачами которого были профилактика и лечение эмоционально-аффективных и мотивационно-волевых расстройств, а также нейрофармакотерапия болевого синдрома.

Исходы исследования

Основной исход исследования. Параметры функционального исхода обозначались абсолютными значениями и вычислялись разницей между показателями по шкалам на момент поступления и выписки (показатель прироста/снижения, дельта, Δ) — Δ MoCA, Δ NIHSS, Δ BI, Δ mRS.

Дополнительные исходы исследования. Особенности психологического статуса оценивались клиническим психологом с использованием методики Спилбергера–Ханина, шкалы депрессии Бека, госпитальной шкалы HADS.

Анализ в подгруппах

Дополнительное исследование касательно психологических изменений проводилось у всех включённых в исследование детей.

Методы регистрации исходов

Для определения уровня и степени тяжести поражения спинного мозга применяли шкалу ASIA (American Spinal Injury Association). Для оценки выраженности спастического синдрома использовали модифицированную шкалу Эшфорта (Modified Ashworth Scale, MAS) и шкалу Тардые (Tardieu Scale). Объективное подтверждение снижения патологического тонуса осуществляли с помощью маятникового текста (инструментальный тест с маятником — объективный и воспроизводимый биомеханический метод оценки спастичности). Для оценки мышечной силы использовали шкалу mRS (Modified Rankin Scale).

Для оценки состояния нутритивного статуса рассчитывали росто-весовые показатели (индекс массы тела) и проводили лабораторный мониторинг (концентрация общего белка, альбумина и лимфоцитов).

Для оценки функциональной активности в повседневной жизни использовали шкалу SCIM III (Spinal Cord Independence Measure III).

Особенности психологического статуса и детско-родительских отношений оценивал клинический психолог при помощи методики Спилбергера–Ханина (опросник Спилбергера предназначен для оценки ситуационной и личностной тревожности), шкалы депрессии Бека (Beck Depression Inventory, BDI), госпитальной шкалы HADS.

Оценка выраженности болевого синдрома проводилась по визуальной аналоговой шкале боли (ВАШ) для детей от 8 лет и старше.

Статистический анализ

Размер выборки предварительно не рассчитывался, в выборке из 23 человек оценивался результат до и после проведения реабилитационных мероприятий.

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью компьютерной программы Statistica Soft Ware v. 6.0 (StatSoft Inc., США). Использовались вычислительные и графические возможности редактора электронных таблиц MS Excel.

Данные проверялись на соответствие парному t-критерию Стьюдента для зависимых совокупностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Среди пациентов, включённых в исследование ($n=23$), было 16 (69,57%) мальчиков и 7 (30,43%) девочек, в диагнозе которых упомянуты последствия ПСМТ: у 15 (65,22%) детей — травмы в области шеи, у 8 (34,78%) — в области груди (табл. 1).

Основные результаты исследования

Основные результаты исследования представлены в табл. 2, значения парного t-критерия Стьюдента — в табл. 3.

Таблица 1. Объекты (участники) исследования

Table 1. Participants

Пациент	Возраст, лет	Уровень травмы
1	16	Шейный (C4–C5)
2	17	Грудной (T6)
3	17	Шейный (C4)
4	17	Шейный (C5–C6)
5	12	Грудной (T7–T8)
6	17	Шейный (C5–C6)
7	17	Шейный (C6–C7)
8	16	Шейный (C3–C5)
9	16	Шейный (C3–C4)
10	17	Шейный (C6–C7)
11	16	Шейный (C5–C6)
12	15	Шейный (C5–C6)
13	17	Шейный (C5–C6)
14	12	Грудной (T6)
15	15	Шейный (C5–C6)
16	16	Шейный (C4–C5)
17	17	Шейный (C4–C5)
18	11	Грудной (T7)
19	10	Грудной (T5–T6)
20	17	Грудной (T8)
21	17	Шейный (C5)
22	11	Грудной (T5)
23	17	Грудной (T5)

Таблица 2. Основные результаты исследования**Table 2.** Primary results

Пациент	Шкалы и тесты, до/после				
	ASIA	Эшфорта	Тардые	Маятниковый	mRS
1	B/C	0/2	0/2	4/6	23/46
2	A/A	0/4	0/4	2/6	50/50
3	A/A	0/0	0/0	6/6	0/0
4	A/A	0/4	0/4	2/6	12/24
5	A/A	0/2	0/2	4/6	50/50
6	A/A	0/1	0/1	5/6	13/18
7	A/A	0/2	0/2	4/6	32/46
8	A/C	0/1	0/1	6/6	0/37
9	A/A	0/3	0/3	3/6	0/0
10	B/B	0/2	0/2	5/6	21/23
11	A/A	0/3	0/2	4/6	11/26
12	A/A	0/2	0/2	3/6	16/20
13	A/A	0/2	0/1	5/6	18/24
14	A/A	2/3	2/2	3/3	50/50
15	B/B	1/2	1/2	3/4	28/33
16	C/D	0/1	0/1	5/6	48/98
17	A/A	4/3	4/3	3/3	8/8
18	B/C	0/3	0/3	4/6	50/80
19	A/A	1/1	1/1	5/5	50/50
20	A/A	2/2	1/2	5/5	50/50
21	A/A	4/3	4/3	3/2	6/6
22	A/A	4/3	4/3	3/1	50/50
23	A/A	2/2	2/2	4/4	50/50

Таблица 3. Значение парного t-критерия Стьюдента**Table 3.** Paired Student *t* tests

Шкалы и тесты	<i>p</i>
Шкала повреждений при травме спинного мозга (ASIA)	0,010
Шкала Эшворта для оценки мышечной спастичности (Ashworth Scale)	0,010
Шкала Тардые для измерения спастичности у пациентов с неврологическими заболеваниями (Tardieu Scale)	0,010
Маятниковый тест	0,010
Модифицированная шкала Рэнкина для оценки степени инвалидности (mRS)	0,001

Из 23 человек 3 (13,04%) не показали положительной динамики, 3 (13,04%) продемонстрировали отрицательную динамику по шкалам Эшфорта и Тардые (у 2 — снижение на 1 балл по обоим шкалам, у 1 — снижение на 1 балл по шкале ВАШ), однако положительная динамика отмечалась при проведении маятникового теста (у 2 детей число колебательных движений увеличилось на два,

у 1 ребёнка — на одно). У 4 (17,39%) детей наблюдалась положительная динамика по шкале ASIA, при этом в 3 (13,04%) случаях отмечалось увеличение чувствительности на один класс, у 1 (4,35%) ребёнка — на два класса (изменения признака статистически значимы: $p=0,010$).

По шкале Эшфорта положительная динамика показана в 16 (69,57%) случаях, из них в 5 (21,74%)

уменьшение спастического синдрома было оценено на 1 балл, в 6 (26,09%) — на 2 балла, в 3 (13,04%) — на 3 балла, в 2 (8,07%) — на 4 балла (изменения признака статистически значимы: $p=0,010$).

По шкале Тардые положительную динамику показали 16 (69,57%) человек, из них у 6 (26,09%) уменьшение спастического синдрома было оценено на 1 балл, у 6 (26,09%) — на 2 балла, у 2 (8,7%) — на 3 балла и ещё у 2 (8,7%) — на 4 балла (изменения признака статистически значимы: $p=0,010$).

При проведении маятникового теста получены следующие результаты: 14 (60,87%) пациентов показали положительную динамику в виде увеличения числа колебательных движений; 7 (30,44%) детей не показали изменений ни до, ни после реабилитационных мероприятий; в 2 (8,7%) случаях наблюдалась отрицательная динамика в виде уменьшения числа колебательных движений (изменения признака статистически значимы: $p=0,010$).

По шкале mRS положительная динамика в виде увеличения мышечной силы была отмечена в 12 (52,17%) случаях (изменения признака статистически незначимы: $p=0,001$).

По шкале SCIM III положительная динамика в виде увеличения независимости в быту наблюдалась у 16 (69,57%) пациентов (изменения признака статистически незначимы: $p=0,001$).

До проведения реабилитационных мероприятий по разработанной методике болевой синдром отсутствовал у 2 (8,7%) пациентов, по окончании (оценка по ВАШ) — у всех включённых в исследование пациентов (изменения признака статистически незначимы: $p=0,009$).

Дополнительные результаты исследования

Частота встречаемости психоэмоциональных нарушений у детей с ПСМТ через 1 и 6 месяцев после травмы ($n=23$) представлена в табл. 4.

Высокий уровень тревоги, который встречался у пациентов при первичном обследовании в 11,5% случаев, при диагностике через 6 месяцев после травмы сохранился только у 1 (4,35%): очень высокая ситуативная тревожность могла быть связана с недопониманием ситуации травмы, несформированной внутренней картиной болезни на интеллектуальном уровне, что выявлялось уже на этапе первичной диагностики.

Согласно результатам диагностики частоты депрессивных тенденций до и после реабилитационных мероприятий, лёгкая ситуативная депрессия, обнаруженная у 7 (30,44%) пациентов при первичном тестировании, сохранялась в 4 (17,39%) случаях при повторном обследовании.

Таким образом, сравнение результатов тестирования пациентов при поступлении и через 6 месяцев после травмы свидетельствует об эффективности методик психологической и медикаментозной коррекции, применяемых в комплексе реабилитационных мероприятий.

Таблица 4. Частота встречаемости психоэмоциональных нарушений у детей с позвоночно-спинномозговой травмой через 1 и 6 месяцев после травмы

Table 4. Rates of mental and emotional disorders in children with spinal cord injury at months 1 and 6 after injury

Шкалы и тесты	$n=23$ (%)	
	1 мес	6 мес
Методика Спилбергер–Ханина		
<i>Личностная тревожность</i>		
• умеренная	15 (65,22)	6 (26,08)
• низкая	5 (21,74)	2 (8,7)
• высокая	3 (13,04)	1 (4,34)
<i>Ситуативная тревожность</i>		
• умеренная	6 (26,08)	4 (17,39)
• высокая	18 (78,26)	9 (39,13)
• низкая	2 (8,7)	1 (4,34)
Шкала депрессии Бека		
• нет	18 (78,26)	22 (95,65)
• лёгкая	7 (30,43)	4 (17,39)
• маскированная	1 (4,34)	-
Госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS)		
<i>Тревога</i>		
• субклиническая	8 (34,78)	3 (13,04)
• клинически выраженная	13 (56,52)	9 (39,13)
• отсутствие	2 (8,7)	14 (60,87)
<i>Депрессия</i>		
• отсутствие	18 (78,26)	23 (100)
• субклиническая	7 (30,43)	3 (13,04)
• клинически выраженная	1 (4,34)	-

Нежелательные явления

Нежелательных явлений в ходе исследования не отмечено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования демонстрируют положительное влияние ранней реабилитации по разработанной методике с применением роботизированной механотерапии в коррекции спастического синдрома у детей с ПСМТ.

Обсуждение основного результата исследования

По результатам проведённого исследования получены результаты, которые позволяют говорить об эффективности комплексной программы реабилитации в коррекции

спастического синдрома у детей с ПСМТ. Положительная динамика после проведенных реабилитационных мероприятий наблюдалась у 20 (86,96%) пациентов. Реабилитация по разработанной методике проводилась на протяжении 6 месяцев: в ранний (от 3 суток до 4 месяцев), промежуточный (от 1 до 3 месяцев) и восстановительный (после 3 месяцев) периоды. В 10 (43,48%) случаях на фоне комплексной программы реабилитации дополнительно применялось медикаментозное лечение (у 3 — тизанидин, тизанидин + Баклосан [баклофен], у 1 — тизанидин + Лирика [прегабалин], у 6 — Лирика). После прохождения реабилитации медикаментозное лечение было продолжено в 5 (21,74%) случаях.

По шкале ASIA положительную динамику показали 4 (17,39%) пациента, чувствительность увеличилась на 1–2 класса. Отмечено достоверно значимое увеличение чувствительности на фоне проведения роботизированной механотерапии ($p < 0,05$).

У 16 (69,57%) пациентов показано уменьшение спастического синдрома (выявлена положительная динамика по шкалам Эшфорта и Тардье). Оценка динамики частоты колебательных движений с использованием маятникового теста показало увеличение показателя у 14 (60,87%) пациентов.

Недостаточный клинический эффект лечения спастико-болевого синдрома у 3 (13,04%) пациентов с повреждением шейного отдела спинного мозга требует дальнейшего исследования и предложения новых инновационных технологий.

Ограничения исследования

В ходе исследования факторов, способных существенным образом повлиять на его результаты, не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование комплексной программы реабилитации детей с индивидуальным режимом позиционирования и ортезирования, нутритивной поддержкой, медикаментозной терапией спазмолитиками, анальгетиками и адьювантами, с использованием преформированных физических факторов, современной лечебной гимнастики с постепенным расширением режима двигательной нагрузки и механотерапии на локомоторных роботизированных комплексах, а также с психологическим сопровождением пациента и его семьи у детей со спастическим синдромом разной степени выраженности показало достоверный положительный клинический эффект у большинства из них.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.В. Попова — обзор публикаций по теме статьи, выбор и исследование пациентов, проведение исследования, предоставление полученных данных, написание текста рукописи; И.Н. Новоселова — концепция и дизайн, обзор публикаций по теме исследования, анализ

полученных данных, научная редакция текста рукописи; И.В. Понина — проведение оценки нутритивного статуса и назначение нутритивной поддержки, обобщение результатов, Е.А. Львова — проведение тестирования и психологическое сопровождение пациентов на протяжении курса реабилитации, обобщение результатов, С.А. Валиуллина — общее редактирование, утверждение рукописи для публикации; С.В. Мещеряков — общее редактирование, утверждение рукописи для публикации. 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.

Благодарности. Авторы выражают признательность за помощь в работе над статьей статистическому отделу, отделу переводов и отделению ОВЛ НИИ неотложной хирургии и травматологии ДЗМ.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Научно-исследовательского института неотложной детской хирургии и травматологии (протокол № 4 от 24.11.2022).

Источник финансирования. Исследование поддержано грантом Правительства г. Москвы «Система комплексной реабилитации детей с острыми травматическими повреждениями на основе организационной модели с применением инновационных медико-конвергентных технологий» (проект № 2412-9).

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 проведении исследования и 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 неприменима. Доступ к данным, полученным в настоящем исследовании, закрыт в связи с конфиденциальностью информации о пациентах.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. O.V. Popova: literature review on the topic of the article, selection and examination of patients, conducting the study, providing the obtained data, writing the manuscript; I.N. Novoselova: concept and design, literature review on the research topic, analysis of the obtained data, scientific editing of the manuscript text; I.V. Ponina: perform the evaluation of the nutritional status and assignment of nutritive support, generalization of results; E.A. Lvova: testing and psychological support of patients during the course of rehabilitation, consolidation of results; S.A. Valiullina: overall editing, approval of the manuscript for publication; S.V. Meshcheryakov: overall editing, approval of the manuscript for publication. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to statistical department, translation department and the rehabilitation department of the Research Institute of Emergency Surgery and Traumatology of the Moscow Healthcare Department.

Ethics approval. Approved by the local ethical committee of the State Budgetary Institution 'Research Institute of Emergency Children's Surgery and Traumatology — Clinic of Dr Roshal' of the Moscow City Health Department (Protocol No. 4 of 24.11.2022). All study participants voluntarily signed an informed consent form prior to inclusion in the study

Funding sources. The study was supported by a grant from the Government of Moscow "System of Comprehensive Rehabilitation for Children with Acute Traumatic Injuries Based on an Organizational Model Using Innovative Medical-Convergent Technologies" (project No. 2412-9).

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

Statement of originality. When conducting the research and creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. Editorial policy on data sharing not applicable to this work. Access to the data obtained in this study is closed due to confidential patient information.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Byvaltsev VA, Kalinin AA, Shepelev BB, Baldanov CB. *Trauma of the spinal cord and spine: textbook*. Irkutsk: Irkutsk State Medical University; 2021. P. 75. (In Russ.)
2. Smolkin AA, Ninnel VG, Korshunova GA. Evaluation of efficiency of methods of neuromodulation in the treatment of spastic syndromes in patients with spinal cord injury. *Saratov journal of medical scientific research*. 2014;10(4):639–645. EDN: TWKEXV
3. Dijkers M, Bryce T, Zanca J. Prevalence of chronic pain after traumatic spinal cord injury: A systematic review. *J Rehabil Res Dev*. 2009;46(1):13–29.
4. Patent RUS № RU 2023620547/21.12.2022. Application No.: 2022623888. Novoselova IN, Ponina IV, Solovyova EP, et al. *Prevention and treatment of somatic complications and compensation of the consequences of spinal cord injury in children*. (In Russ.) EDN: YADZQS
5. Ninel VG, Smol'kin AA, Korshunova GA, Norkin IA. Methods of neuromodulation in the treatment of spastic syndrome and their role in complex rehabilitation of patients after spine and spinal cord injuries. *Russian Journal of spine surgery*. 2016;13(3):15–21. doi: 10.14531/ss2016.3.15-21 EDN: WKYPAN
6. Patent RUS № RU 2020620025/10.01.2020. Application No.: 2019622513. Valiullina SA, Novoselova IN, Ponina IV, et al. *System of early comprehensive rehabilitation of children with severe spinal cord injury*. (In Russ.) EDN: LINTRG
7. Ereimeyev YA, Dzhangildin YT, Kochetkov AV, Kulikov MP. Clinical and psychological features of patients with traumatic spinal cord disease. In: *X International Conference "Asvomed-2008: Modern technologies of restorative medicine"*: Proceedings of the conference, Sochi, May 3–9. Sochi; 2008. P. 68–69. (In Russ.)
8. Mohta M. The Spinal Cord Medicine Consortium. In: *Depression following spinal cord injury: A clinical practice guideline for primary care physicians*. Consortium for Spinal Cord Medicine Administrative and financial support provided by Paralyzed Veterans of America; 1998. P. 3–5. Available from: <https://www.unitedparalysis.org/files/Depression.pdf>
9. Lvova EA, Sidneva Yu G. Psychological and psychiatric care for children with severe spinal cord injury. *Almanac Institute of special education*. 2016;(25):58–64. EDN: XHNXL
10. Damin VD. Robotic mechanotherapy in neurorehabilitation. *Vestnik Almatinskogo gosudarstvennogo instituta usovershenstvovaniya vrachei*. 2013;(53):83–88. EDN: WWBMGL

ОБ АВТОРАХ

* **Попова Ольга Владимировна;**

адрес: Россия, 119180, Москва, ул. Б. Полянка, д. 22;
ORCID: 0000-0003-4434-0659;
eLibrary SPIN: 5125-6980;
e-mail: oglapopova@mail.ru

Новоселова Ирина Наумовна, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0003-2258-2913;
eLibrary SPIN: 1406-1334;
e-mail: i.n.novoselova@gmail.com

Понина Ирина Витальевна;

ORCID: 0000-0002-0060-7895;
eLibrary SPIN: 1753-6156;
e-mail: ponina.irina@mail.ru

Львова Екатерина Алексеевна;

ORCID: 0000-0002-6551-7305;
eLibrary SPIN: 2595-5951;
e-mail: Lvova.kararina@gmail.com

Мещеряков Семен Владимирович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-3701-4628;
eLibrary SPIN: 3277-3926;
e-mail: msaemon@rambler.ru

Валиуллина Светлана Альбертовна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-1622-0169;
eLibrary SPIN: 6652-2374;
e-mail: vsa64@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Olga V. Popova,** MD;

address: 22 Bolshaya Polyanka st, Moscow, Russia, 119180;
ORCID: 0000-0003-4434-0659;
eLibrary SPIN: 5125-6980;
e-mail: oglapopova@mail.ru

Irina N. Novoselova, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0003-2258-2913;
eLibrary SPIN: 1406-1334;
e-mail: i.n.novoselova@gmail.com

Irina V. Ponina;

ORCID: 0000-0002-0060-7895;
eLibrary SPIN: 1753-6156;
e-mail: ponina.irina@mail.ru

Ekaterina A. Lvova;

ORCID: 0000-0002-6551-7305;
eLibrary SPIN: 2595-5951;
e-mail: Lvova.kararina@gmail.com

Semen V. Meshcheryakov, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0003-3701-4628;
eLibrary SPIN: 3277-3926;
e-mail: msaemon@rambler.ru

Svetlana A. Valiullina, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-1622-0169;
eLibrary SPIN: 6652-2374;
e-mail: vsa64@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab677338>

EDN: QXFKLM

Виртуальная реальность в медицинской реабилитации

С.Г. Щербак^{1, 2}, Д.А. Вологжанин^{1, 2}, С.В. Макаренко^{1, 2}, А.С. Голота², Т.А. Камилова²¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;² Городская больница № 40 Курортного административного района, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Пациентам с двигательными и/или когнитивными расстройствами, перенёсшим инсульт, травму головного или спинного мозга, пациентам с хроническими болевыми синдромами, нейродегенеративными заболеваниями и неврологическими последствиями тяжёлой формы COVID-19 не всегда и недостаточно эффективно помогают фармакотерапия и традиционные методы реабилитации. Одним из инновационных терапевтических подходов для восстановления утраченных функций является вмешательство с использованием виртуальной реальности — комбинированной интерактивной технологии, которая создаёт виртуальный мир посредством компьютерного моделирования, обеспечивает мультисенсорную стимуляцию у пациентов, активирует восстановительные нейронные механизмы и оказывает анальгезирующий эффект. Использование виртуальной реальности в неврологии возросло за последние годы, продемонстрировав её эффективность в улучшении как двигательных, так и когнитивных результатов лечения широкого спектра неврологических и нейропсихологических дисфункций за счёт нейропластичности и нейрогенеза в повреждённых областях мозга. Реабилитация на основе виртуальной реальности применяется либо отдельно, либо в сочетании с другими формами терапии. Наиболее эффективно комбинированное лечение, включающее в себя лечебную физкультуру, физиотерапию, психологическое консультирование, стандартную когнитивную тренировку и упражнения с применением иммерсивной виртуальной реальности, создающей ощущение присутствия в трёхмерной цифровой среде, которая позволяет пользователю погружаться в виртуальную среду и натуралистически взаимодействовать с виртуальными объектами с помощью головных дисплеев и датчиков мониторинга тела. Согласно результатам систематических обзоров и метаанализов, у многих или большинства пациентов в зависимости от исходного состояния наблюдается повышение объёма произвольных движений, улучшение равновесия, когнитивных функций, настроения и качества жизни, снижение тревожности и интенсивности боли. Таким образом, применение терапии на основе виртуальной реальности является перспективным подходом в реабилитации пациентов с неврологической симптоматикой. Неврологическая реабилитация на основе виртуальной реальности позволяет индивидуально определить сложность и интенсивность упражнений, повысив комплаентность пациентов за счёт геймификации (игрофикации). Тем не менее необходимы дальнейшие исследования для стандартизации тестируемых методов виртуальной реальности, уточнения критериев включения/невключения пациентов, участвующих в клинических исследованиях, а также для оптимизации протоколов и изучения долгосрочных эффектов.

Ключевые слова: виртуальная реальность; реабилитация; неврологическое расстройство; когнитивное расстройство; инсульт; травма головного мозга; травма спинного мозга; хронический болевой синдром; двигательные функции; когнитивные функции.

Как цитировать:

Щербак С.Г., Вологжанин Д.А., Макаренко С.В., Голота А.С., Камилова Т.А. Виртуальная реальность в медицинской реабилитации // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 134–153. DOI: 10.36425/rehab677338 EDN: QXFKLM

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab677338>

EDN: QXFKLM

Virtual Reality in Medical Rehabilitation

Sergey G. Scherbak^{1,2}, Dmitry A. Vologzhanin^{1,2}, Stanislav V. Makarenko^{1,2}, Aleksandr S. Golota², Tatyana A. Kamilova²

¹ Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

² Saint-Petersburg City Hospital № 40, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Patients with motor and/or cognitive disorders, a history of stroke or head/spinal cord injury, chronic pain, neurodegenerative diseases, or neurological complications of severe COVID-19 may not benefit from pharmacotherapy or traditional rehabilitation. Virtual reality is an innovative therapeutic approach that restores lost functions. This interactive technology uses computer modeling to create a virtual world. Virtual reality provides multisensory stimulation, activates restorative neural mechanisms, and produces an analgesic effect. In recent years, virtual reality has become more prevalent in neurology. It improves motor and cognitive outcomes in patients with various neurological and neuropsychological dysfunctions. These improvements are the result of neuroplasticity and neurogenesis in brain lesions. Virtual reality-based rehabilitation can be used alone or in combination with other treatment options. The most effective treatment combines exercise therapy, physical therapy, psychological counseling, standard cognitive training, and training with immersive virtual reality technology. This technology creates a sense of presence in a three-dimensional digital environment. With head-mounted displays and body monitoring sensors, users can interact naturally with virtual objects. Systematic reviews and meta-analyses have shown that depending on the initial condition, most patients demonstrate improvement in voluntary range of motion, balance, cognitive function, mood, quality of life, anxiety, and pain. Therefore, virtual reality-based therapy is a promising rehabilitation option for patients with neurological symptoms. Virtual reality-based neurological rehabilitation allows for the personalized selection of exercise complexity and intensity, thereby increasing patient compliance through gamification. However, further research is needed to standardize virtual reality-based modalities, clarify inclusion and exclusion criteria for clinical trials, optimize protocols, and evaluate long-term effects.

Keywords: virtual reality; rehabilitation; neurological disorder; cognitive disorder; stroke; brain injury; spinal cord injury; chronic pain syndrome; motor functions; cognitive functions.

To cite this article:

Scherbak SG, Vologzhanin DA, Makarenko SV, Golota AS, Kamilova TA. Virtual Reality in Medical Rehabilitation. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):134–153. DOI: 10.36425/rehab677338 EDN: QXFKLM

Submitted: 19.03.2025

Accepted: 26.05.2025

Published online: 19.06.2025

Список сокращений

VR — виртуальная реальность

иVR/ниVR — иммерсивная/неиммерсивная виртуальная реальность

РКИ — рандомизированное контролируемое исследование

ПТСР — посттравматическое стрессовое расстройство

TMS — транскраниальная магнитная стимуляция

TCKK — терапия соматоконгнитивной координации

TSM — травма спинного мозга

IVRMT (immersive virtual reality mirror therapy) — метод реабилитации, сочетающий технологии виртуальной реальности и зеркальную терапию

VRRS (Virtual Reality Rehabilitation System) от Khymeia — электронная система для удалённой реабилитации когнитивных и моторных функций

ВВЕДЕНИЕ

Виртуальная реальность (VR) — искусственный мир, созданный средствами информационных технологий и способный воздействовать на человека через органы чувств. Виртуальная реальность — быстро развивающаяся перспективная цифровая технология лечения и/или реабилитации пациентов с различными заболеваниями, расстройствами и травмами, которая создаёт «продвинутую форму интерфейса пользователь-компьютер» с помощью компьютерного программного обеспечения [1, 2]. Технология VR включает в себя моделирование и взаимодействие с виртуальными объектами в реальном времени с помощью множественных сенсорных модальностей [3]. Виртуальная реальность может быть неиммерсивной (ниVR), полностью иммерсивной (иVR) или полуиммерсивной в зависимости от степени погружения.

Прилагательное «иммерсивный» в отношении VR является общепринятым. Корпорация Google на запрос «иммерсивная виртуальная реальность» выдаёт более 1 млн результатов (дата обращения: 8 мая 2025 года).

Неиммерсивная VR позволяет пользователям одновременно взаимодействовать с виртуальным и физическим миром при просмотре видео на экране телевизора или дисплея компьютера. Низкая стоимость, лёгкая доступность и незначительный уровень побочных эффектов делают эту форму VR-технологии популярной в реабилитации. Полуиммерсивная VR позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальной средой через очень большой экран, обеспечивая некоторую степень частичного погружения без ущерба для способности воспринимать реальный мир. Иммерсивная (погружающая) VR — трёхмерная компьютерная симуляция, которая с помощью специализированного электронного оборудования позволяет пользователям погрузиться в виртуальную среду и обеспечивает реалистичное взаимодействие человека с визуальными эффектами и звуками реальной среды [4].

Google на запрос «войти в виртуальную среду» выдает более 9 млн результатов (дата обращения: 8 мая 2025 года).

Технология иVR создаёт виртуальный цифровой мир посредством компьютерного моделирования и обеспечивает сложную, реалистичную и немедленную обратную связь с использованием программного обеспечения и аппаратных устройств (наушников, шлемов, очков, перчаток, жилетов и т.д.), чтобы дать пользователю ощущение погружения [5].

Устройства ниVR используются для проецирования виртуальных сред на экран и позволяют взаимодействовать с объектами с помощью джойстика или клавиатуры. Для полного погружения пользователя в трёхмерный виртуальный мир технология иVR включает в себя использование программного обеспечения и головных дисплеев (head-mounted displays, HMD), обеспечивающих обзор виртуальной среды на 360°. Датчики отслеживания движения и устройства прямого ввода данных позволяют пользователю осматриваться и естественным образом взаимодействовать с виртуальной средой. Создаваемые в иVR виртуальные среды пациент воспринимает как реальные (погружение), ощущая себя частью этого мира и взаимодействуя со всеми элементами в нём с помощью ручных контроллеров или собственных рук (присутствие) [6].

Виртуальная реальность является эффективным инструментом, позволяющим вовлечь широкий круг пациентов, нуждающихся в проведении реабилитационных мероприятий, за счёт увлекательности самого процесса погружения в искусственный мир.

В последние годы технология VR всё шире используется в неврологической, нейропсихологической, педиатрической, ортопедической и других областях реабилитации. Мультисенсорная терапия на основе VR за счёт геймификации (использование игровых элементов в любом неигровом контексте) повышает мотивацию и вовлечённость пациента в процесс физической реабилитации, уменьшая субъективное восприятие физической нагрузки, монотонность и скуку традиционного реабилитационного процесса [7]. Кроме того, устройства VR и видеоигры позволяют регулировать интенсивность и сложность упражнений

для каждого пациента, что позволяет максимально индивидуализировать и эмоционально окрасить обучение функциональными движениями в безопасной виртуальной среде, в том числе при использовании телекоммуникационных технологий при дистанционно контролируемой реабилитации [6].

Использование технологии ВР требует осторожности из-за риска таких потенциальных нежелательных эффектов, как кибернетическая болезнь [8], которая характеризуется симптомами укачивания, включая тошноту, головокружение, дезориентацию, головную боль, потливость и общий дискомфорт [3]. В этой связи безопасность определяется как отсутствие нежелательных явлений, связанных с ВР-терапией, а переносимость — как способность пациентов завершать назначенные сеансы без прерывания из-за дискомфорта или других проблем, связанных с ВР [9].

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В НЕВРОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Неврологические расстройства, такие как последствия инсульта и хронические болевые синдромы, оказывают глубокое влияние на независимость и качество жизни, особенно когда нарушаются функции рук. Хотя традиционная физиотерапия обеспечивает некоторое восстановление нейронов, сохраняется потребность в поиске новых эффективных технологий реабилитации. Технология ВР может служить инструментом для изучения, диагностики и лечения неврологических и нейропсихологических расстройств. Предполагается, что мультисенсорная обратная связь может повысить нейронную пластичность, лежащую в основе неврологического и нейропсихологического восстановления. Навыки, приобретённые во время ВР-терапии, могут переноситься в реальную жизнь [1]. Сочетание аппаратного и программного обеспечения позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальными объектами и средами, как если бы они были материальными (реальными) объектами. В контексте реабилитации игровая природа ВР делает опыт пациента более приятным и способствует вовлечению в виртуальные терапевтические упражнения, специально разработанные для неврологического восстановления [3].

Двигательные расстройства у пациентов, переживших инсульт

Визуальная, слуховая и кинестетическая мультисенсорная природа иВР позволяет пациентам полностью погрузиться в трёхмерную виртуальную среду, в которой человек может испытать изменённую версию реальности — феномен, который используется в реабилитации пациентов, перенёвших инсульт [10]. Интерактивная иВР

предоставляет пациентам, перенёвшим инсульт, многоканальный сенсорный ввод через такие устройства, как контроллеры, перчатки и экзоскелеты, способствует повышению нейронной функциональной пластичности, может значительно улучшить функцию верхних конечностей и функцию равновесия [2].

В сообщении R.V. Bailey [10] приведено описание клинического случая о нарушении функции правой руки у 75-летнего мужчины после ишемического инсульта. После лечения в больнице и реабилитационном центре пациент мог нормально ходить, но у него сохранялись афазия и контрактуры суставов правой руки с нарушением моторики (сохранилось только активное движение пальцев). Спустя 7 лет после инсульта он снова обратился за помощью. Эрготерапевт разработал комплексную программу упражнений в ВР для управления мышечным тонусом с помощью приложения на гарнитуре пациента, в котором пациент взглядом отслеживает движения летящего дракона, что способствует растяжению шейного отдела позвоночника и увеличению диапазона движений, а также компьютерные игры Balloon Blast, в которой надо лопать цветные шарики смахивающими движениями для увеличения диапазона движений плеча, и Color Match — для движений верхних конечностей, имитирующих боксёрские, чтобы включить в действие когнитивный компонент. После каждого сеанса пациент мог визуализировать результат и наблюдать изменения. В дополнение к ежедневной ВР-терапии пациент выполнял физические упражнения по 5 дней в неделю, включая упражнения на перенос веса тела на правую руку в положении на четвереньках и выполнение активных вспомогательных движений в правой верхней конечности. Этот план постоянно обновлялся на протяжении всей ВР-терапии, чтобы игры в цифровой среде оставались сложными и способствовали прогрессу. К концу лечения пациент выполнял упражнения с сопротивлением для правой руки и кисти с весом около 1 кг, продемонстрировав улучшения во всех измеряемых областях: увеличение скорости движения правой рукой в ответ на стимул, увеличение диапазона сгибания плеча на 10° и улучшение качества движения (ускорение-замедление во время движения) на 8,5%. Представленный в работе случай свидетельствует о том, что комбинация ВР и традиционной терапии может существенно увеличить силу и подвижность правой верхней конечности, улучшив таким образом качество повседневной жизни пациента даже спустя годы после инсульта [10].

Вмешательства на основе ВР осуществляются с помощью различных систем (оборудования и программного обеспечения). Как с клинической, так и с исследовательской точки зрения важно рассмотреть использование и эффективность конкретной системы ВР. Так, L. Macchitella и соавт. [1] провели описательный обзор исследований, в которых использовалась система VR Khymeia — Virtual Reality Rehabilitation System (VRRS),

реализующая нейropsychологические и неврологические реабилитационные процедуры на основе иBP или ниBP. VRRS предоставляет как нейромоторные, так и когнитивные модули для различных реабилитационных задач. Тренировки с VRRS можно сочетать с физиотерапией и/или другим стандартным лечением для улучшения двигательных функций, в том числе в отделении интенсивной терапии. Мультиmodalное лечение как сочетание различных стратегий реабилитации, включая традиционное лечение (физиотерапию и трудотерапию), роботизированное обучение и нейромоторные тренировки на основе VRRS, может обеспечить больше преимуществ, чем только традиционное лечение, в улучшении двигательных функций у пациентов с неврологическими нарушениями, включая инсульт и нейродегенеративные расстройства.

Использование VRRS уменьшает двигательную дисфункцию паретичной верхней конечности у пациентов, перенёсших инсульт, тогда как в моторике нижней паретичной конечности не было обнаружено никаких изменений [11]. Комбинированное с физиотерапией лечение VRRS продемонстрировало более значительное улучшение двигательных функций верхних или нижних конечностей, а также снижение интенсивности боли, улучшение качества жизни и показателей функциональной независимости у пациентов, перенёсших инсульт, по сравнению с традиционным лечением [12]. Пациенты выполняли виртуальные сенсомоторные задания, направленные на стимуляцию мышечной силы, диапазона движений суставов, устойчивости позы, реакций равновесия и движений таза. Каждый сеанс состоял из различных типов двигательных заданий, включая манипулирование объектами в виртуальном сценарии, статическую тренировку равновесия, мобилизацию лёжа на спине, вспомогательные и активные упражнения для контроля туловища и равновесия в положении сидя, упражнения на смещение веса и шагание в статическом и динамическом равновесии с использованием стабилметрической и проприоцептивной/динамической платформы [1].

Расстройство равновесия затрагивает до 70–80% пациентов, перенёсших инсульт. Процесс функционального восстановления после инсульта зависит от способности мозга адаптироваться и реорганизовываться на ранних стадиях заболевания. Реабилитация играет важную роль в содействии этой адаптивности. В клинических исследованиях доказано, что новые нейрофизиологические подходы, такие как BP-терапия и повторяющаяся транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС), улучшают функцию равновесия у пациентов, перенёсших инсульт, при применении по отдельности, но потенциальные синергетические эффекты объединения BP и ТМС на функцию равновесия и нейропластичность у пациентов с инсультом остаются неопределёнными. Известно, что ТМС вызывает деполяризацию аксонов, повышает возбудимость кортикоспинальной системы, стимулирует пластичность

нейронов, усиливает синаптическую трансмиссию и реактивность нервной системы [13]. Y. Liu и соавт. [14] провели многоцентровое рандомизированное контролируемое исследование (РКИ) для оценки комбинированного воздействия BP и ТМС на восстановление равновесия и нейропластичность у постинсультных пациентов. Участники были случайным образом распределены в 4 группы: BP, ТМС, BP+ТМС и стандартная тренировка равновесия. Все группы дополнительно получали по 2 часа стандартной реабилитации ежедневно. Оценку проводили через 2 и 4 недели с помощью шкалы Берг (основной показатель) и других тестов функционального состояния, а также биомаркеров нейропластичности (нейротрофический фактор мозга BDNF, фактор роста эндотелия сосудов VEGF и др.). Авторы установили, что сочетание BP и транскраниальной ТМС демонстрирует синергетический эффект в восстановлении постинсультных нарушений, усиливая мозговой метаболизм, стимулируя экспрессию BDNF (brain-derived neurotrophic factor) и VEGF (vascular endothelial growth factor), способствуя пролиферации и дифференцировке нервных клеток и улучшая перфузию мозга. Авторы подчёркивают необходимость дальнейших исследований для оценки долгосрочных эффектов такого подхода.

Более чем в 80% случаев инсульта у пациентов наблюдаются нарушения функции верхних конечностей, включая слабость или паралич, уменьшение диапазона движений, спастичность, проблемы с координацией, сенсорные изменения и нарушение мелкой моторики [15]. Двигательная реабилитация направлена на улучшение двигательного контроля, координации и функциональных способностей путём вовлечения поражённой конечности в целенаправленные действия, такие как захват и манипулирование объектами, свободно перемещающимися в виртуальной среде, разгибание запястья или пальцев [16]. Зеркальная терапия — широко применяемый метод реабилитации с использованием статичного зеркала, в котором отражается здоровая верхняя конечность таким образом, что поражённая рука визуально заменяется её зеркальным изображением для создания визуальной иллюзии нормального движения конечности. Изображение непоражённой конечности, представленное в режиме виртуального отражения, способствует формированию у мозга иллюзии нормального функционирования поражённой конечности. Считается, что эта визуальная иллюзия после повторения действий перестраивает нейронные связи в мозге, улучшая тем самым двигательную функцию верхних конечностей и уменьшая боль у пациентов, перенёсших инсульт. Однако приверженность к зеркальной терапии со временем снижается, так как пациенты устают от простых движений, которые обычно используются в зеркальной терапии [17].

Технология зеркальной иBP привлекла внимание как перспективная технологическая инновация для реабилитации верхних конечностей после инсульта. Зеркальная

BP-терапия — вариант традиционной зеркальной терапии, при которой пациенты видят виртуальное отражение своей поражённой конечности, движущейся синхронно с фактическим движением непоражённой руки [15, 18]. Вместе с иллюзией правильного функционирования поражённой конечности мозг получает положительную обратную связь, что помогает облегчить боль, уменьшить отёк и улучшить двигательную функцию и координацию, при этом зеркальная терапия стимулирует нейропластичность мозга для реорганизации нейронных путей и реинтеграции сенсорных и двигательных функций [3]. D.B. Mekbib и соавт. [19], изучая механизм стимулирования моторной и теменной коры с использованием зеркальной иBP, обнаружили, что упражнения по отражению конечностей в иBP активируют систему зеркальных нейронов в мозге и что изменение межполушарной функциональной связанности двигательных областей коры после тренировок по зеркальному отражению конечностей в иBP значимо коррелирует с функциональным улучшением. Исследователи пришли к выводу, что упражнения в зеркальной иBP улучшают кортикальную реорганизацию с последующим улучшением двигательных функций. W.K. Chang и соавт. [20] подтвердили, что терапия с использованием зеркальной иBP повышает нейропластичность в двигательной коре посредством нейронной реорганизации и адаптации после травмы, что проявляется восстановлением двигательных функций у пациентов, перенёсших инсульт.

G. Gebreheat и соавт. [17] опубликовали обзор применения зеркальной терапии с эффектом погружения в BP (*immersive virtual reality mirror therapy, IVRMT*) для реабилитации функции руки после инсульта, в котором они утверждают, что IVRMT является безопасным методом восстановления моторики верхних конечностей после инсульта. Во всех включённых в обзор исследованиях IVRMT реализована с использованием программного обеспечения (или приложений) и очков BP, которые позволяют скоординированно дублировать движения здоровой руки движениями поражённой руки: таким образом пациенты погружаются в зеркальную иллюзию двусторонней активности и активного использования поражённой конечности. IVRMT включает в себя упражнения, функциональную деятельность и игровые виртуальные задачи. Игровые тренировки как мотивирующие и вовлекающие участников доминировали во всех протоколах, однако клинические протоколы вмешательства различались во всех исследованиях, что препятствует проведению любых прямых сравнений.

Хотя авторы всех исследований, проанализированных G. Gebreheat и соавт. [17], пришли к выводу, что IVRMT является хорошо переносимым и безопасным вмешательством для пациентов с постинсультным парезом верхних конечностей, в некоторых сообщениях описаны симптомы киберболезни, вызванные встроенной в методику IVRMT

зеркальной терапии и способные влиять на терапевтическую эффективность занятий [15, 21]. В целом для пациентов, переживших инсульт, по сравнению с людьми того же возраста без инсульта, участие в виртуальных играх оказалось более трудоёмким, при этом степень сложности закономерно соответствовала тяжести функционального расстройства. Повседневное разочарование от осознания невозможности использовать поражённую конечность подавляет веру в успешность восстановления в ней движений. В этой связи стоит задача разработки новых эффективных технологий для улучшения результатов восстановления после инсульта. Тем не менее в большинстве проанализированных исследований подтверждается достигнутый прогресс в восстановлении функции верхних конечностей после зеркальной терапии с погружением в BP. Только в одном исследовании авторы пришли к выводу, что IVRMT эффективнее традиционной зеркальной терапии [21]. Для окончательных выводов относительно преимуществ этого типа терапии в реабилитации верхних конечностей необходимо провести методологически надёжные сравнительные исследования, чтобы разработать единый стандартизированный протокол IVRMT.

Наиболее популярным вариантом тренировок в BP с помощью головных дисплеев были ручные контроллеры для отслеживания положения рук в пространстве, однако удержание ручного контроллера может быть сложным или даже невозможным для людей с нарушениями моторики рук. Чтобы решить эту проблему, обычно используются ленты (ремни) для фиксации контроллера на руках участников или отслеживание положения рук (пальцев) с помощью инфракрасной камеры Leap Motion (Ultraleap, США). С.Р. Камт и соавт. [16] пользовались безмаркерным отслеживанием, включённым в систему Oculus Quest 2, которое устраняет необходимость держать или носить контроллеры и позволяет пациенту двигаться без ограничений.

Почти во всех исследованиях (12 из 13), посвящённых иBP-реабилитации верхних конечностей, включённых в обзор M. Ceradini и соавт. [3], отмечается улучшение по меньшей мере одного из количественных клинических показателей и/или облегчение боли у пациентов с различными типами неврологических расстройств. Среди отмеченных преимуществ продемонстрировано улучшение физических (сила и объём движений, улучшение координации), функциональных (повышение независимости в повседневной деятельности) и когнитивных (улучшение внимания, памяти и исполнительных функций) показателей. Пациенты с болевыми синдромами сообщали о значительном облегчении боли. Среди факторов, определяющих привлекательность иBP для восстановления функции верхних конечностей, наиболее часто упоминаются простота использования, повышенная вовлечённость пациентов. Полезным для пациентов может быть отвлечение от больничной

обстановки на время процедуры. Поскольку больничная рутина не всегда оказывает положительное влияние на эффективность лечения, иммерсивная и интерактивная природа ВР-терапии, приносящая положительные эмоции, мотивирует пациентов прилагать больше усилий во время реабилитационных упражнений. Кроме того, ВР подходит для телереабилитации, когда пациенты выполняют упражнения, не выходя из дома, при необходимости следуя голосовым инструкциям терапевта. Телереабилитация сокращает или устраняет необходимость физического присутствия пациентов в клинике, уменьшая неудобства и расходы. Это особенно важно для пациентов с серьёзным двигательным дефицитом. Объективные показатели результативности восстановления дают врачам полную картину состояния пациентов и позволяют персонализировать варианты вмешательства, что в конечном итоге повышает их эффективность. Это обеспечивает пациентоориентированный подход, ускоряющий функциональное восстановление.

Виртуальная реальность является эффективной дополнительной терапией для восстановления вербальной коммуникации у пациентов с афазией после ишемического инсульта. С помощью реабилитационного устройства BTS-Nirvana, которое использует полуиммерсивную ВР в лечении хронической постинсультной афазии, удалось достичь большего улучшения, чем в контрольной группе, проходившей традиционную речевую и когнитивную тренировку. Стойкое улучшение сохраняется и через полгода наблюдения [22]. Разработано специализированное мобильное приложение ВР для реабилитации речи у пациентов с афазией после инсульта [23].

Повреждение спинного мозга

Травма спинного мозга (ТСМ) может привести к сенсорной, двигательной, мочеполовой и кишечной дисфункции ниже уровня повреждения. Пациенты с ТСМ могут испытывать множество других нарушений, таких как спастичность, боль и эмоциональные расстройства, которые серьёзно влияют на способность выполнять повседневные действия и снижают качество жизни. Основным методом лечения пациентов с ТСМ является реабилитационная тренировка для восстановления двигательных функций.

L. Wang и соавт. [2] провели систематический обзор с метаанализом 16 исследований, в том числе 5 РКИ, чтобы изучить общий эффект от любых вмешательств на основе ВР на функциональные показатели, оценить влияние различной продолжительности вмешательства и сравнить изменения у пациентов с ТСМ в группах ВР и традиционной реабилитации. Индекс повседневной независимости пациента с повреждением спинного мозга (spinal cord independence measure, SCIM), разработанный для пациентов с ТСМ, оказался очень чувствительным к функциональным изменениям во время реабилитации,

что делает его важным инструментом оценки. Метаанализ публикаций результатов исследования пациентов по методике SCIM в баллах не показал значимой разницы до и после ВР-тренировок, а также между ВР и традиционными реабилитационными методами. В то же время метаанализ выявил более значительные улучшения двигательной функции рук в тесте «Коробка и кубики» (функциональный тест, используемый в реабилитационной медицине для оценки ловкости руки) по сравнению с традиционной реабилитацией. Поднятие и перемещение кубика в ящик требуют скоординированных движений всех анатомических отделов руки, и тренировка с ВР может оказаться более целенаправленной и эффективной в выполнении таких координационных задач, чем традиционная реабилитация, с точки зрения мелкой моторики и координации. Однако в целях оптимизации тренировок с ВР необходимо изучить, как различные типы ВР влияют на функцию руки у пациентов с ТСМ.

Индекс ходьбы пациента с повреждением спинного мозга (walking index for spinal cord injury, WISCI) является надёжным показателем такого фундаментального аспекта ТСМ, как способность ходить. В то время как общий анализ показывает значимое улучшение показателей WISCI после тренировки с ВР, анализ подгрупп не выявил влияния длительности одного вмешательства (<45 или ≥45 минут), т.е. повышение индекса WISCI, наблюдаемое в общем анализе, не связано с продолжительностью отдельных сеансов. Возможно, другие факторы, такие как совокупное время вмешательства или тип используемых задач ВР, играют более важную роль в улучшении способности ходить. Таким образом, хотя ВР продемонстрировала потенциальную пользу в улучшении функции ходьбы, существует необходимость оптимизации протоколов вмешательства ВР для пациентов с ТСМ. Исследование также показывает отсутствие улучшения показателей в тесте вставания со стула и ходьбы на время после тренировки ВР. Возможно, это связано с тем, что данный тест фокусируется на оценке общего динамического баланса, скорости ходьбы и способности поворачиваться — навыков более высокого уровня, чем просто хождение по прямой. Достижение значительных улучшений в этой области может потребовать более длительной или более интенсивной тренировки, которую текущая сессия ВР, по видимому, не обеспечивает в достаточной степени.

Таким образом, всесторонний метаанализ показывает, что ВР-вмешательства не приводят к значительным улучшениям двигательной функции нижних конечностей у пациентов с ТСМ. Несмотря на очевидные преимущества, такие как мотивационное подкрепление и повышенная вовлечённость пациента, результаты свидетельствуют об ограниченном влиянии ВР на улучшение двигательной функции. Возможно, неутешительные результаты ВР-вмешательств связаны с используемым оборудованием. Примечательно, что все исследования

двигательной функции нижних конечностей использовали ниВР-платформы, которые в отличие от иВР-технологии не повышают концентрацию внимания пациента. Следовательно, иммерсивные методы ВР могут оказаться перспективными в улучшении двигательной функции нижних конечностей у пациентов с ТСМ. На эффективность реабилитации могут влиять и другие факторы, присущие тренировкам с упражнениями, такие как характер задач в каждой программе ВР, в связи с чем необходимо определение оптимальной структуры ВР, адаптированной к потребностям реабилитации конкретного параметра движения пациента с ТСМ [2].

Данный анализ продемонстрировал значительное улучшение функции равновесия у пациентов с ТСМ после вмешательств с ВР. Хотя большинство пациентов отдаёт приоритет способности ходить как конечной цели реабилитации после ТСМ, функция равновесия играет решающую роль в облегчении ходьбы. Тест на предел устойчивости (равновесие в условиях относительно фиксированного центра тяжести) и шкала баланса Берг (равновесие в условиях постоянно смещающегося центра тяжести) служат надёжным показателем функции равновесия у пациентов. В исследовании [2] наблюдалось улучшение обоих показателей, однако следует отметить, что функция баланса заметно улучшилась при движении только во фронтальной, но не сагиттальной плоскости.

Для пациентов с ТСМ крайне важно начинать тренировки сразу после стабилизации состояния пациента. Достижение улучшений в этой области требует длительной реабилитации с большей продолжительностью сеансов. В настоящее время программы ВР-реабилитации сосредоточены в основном на определённых функциях с меньшим вниманием к активностям повседневной жизни, которые являются основной целью реабилитации. Следовательно, необходимо разрабатывать программы, адаптированные к потребностям пациентов с ТСМ в повседневной жизни. Пациенты с ТСМ демонстрируют более низкий уровень принятия вмешательств с ВР по сравнению с традиционными методами реабилитации. ВР вызывает у некоторых пациентов побочные реакции, характерные для киберболезни. Будущие исследования должны уделять первоочередное внимание оценке частоты и характера побочных эффектов, испытываемых пациентами [2].

Черепно-мозговая травма

R. De Luca и соавт. [24] установили, что нейропсихологическая тренировка процесса внимания, реализованная с помощью VRRS, эффективнее, чем то же лечение, основанное на занятиях с бумагой и карандашом, у пациентов с черепно-мозговой травмой. В следующем исследовании эти же авторы [25] оценили эффективность когнитивной тренировки с VRRS в улучшении исполнительных функций пациентов с черепно-мозговой травмой. Пациенты

экспериментальной группы прошли VRRS-тренировку исполнительных функций, в то время как контрольной группе была предоставлена традиционная, когнитивная терапия, направленная на тренировку временной и пространственной/топографической ориентации, внимания, памяти и логических ассоциаций. Сравнение оценок до и после лечения показало улучшение всех изученных показателей в экспериментальной группе, в то время как в контрольной группе улучшились только некоторые показатели. Исследования R. De Luca и соавт. [24, 25] показывают, что пациенты с черепно-мозговой травмой могут получить пользу от когнитивной терапии с использованием ВР.

Многоцентровое РКИ с аналогичным дизайном также оценило эффективность когнитивной тренировки на основе неиммерсивной VRRS, реализованной путём телекоммуникации, в улучшении глобального когнитивного функционирования и исполнительных функций у пациентов с тяжёлой черепно-мозговой травмой [26]. Нейропсихологические эффекты двигательной терапии с помощью системы теле-VRRS по видеоконференцсвязи сравнивались с эффектами традиционной очной двигательной реабилитации на дому у пациентов с тяжёлой черепно-мозговой травмой, проводимой физиотерапевтом или логопедом. Глобальное функциональное и общее состояние здоровья улучшилось как в группе теленейро-VRRS, так и контрольной группе. В отношении спастичности аналогичного эффекта не отмечено, однако только в группе теленейро-VRRS статистически значимо улучшились двигательные (уровень функциональной независимости) и когнитивные (лобные функции/исполнительные способности) функции, а также показатели психологического благополучия и качества жизни, снизились симптомы тревожности и депрессии. Результаты свидетельствуют о том, что VRRS является подходящим альтернативным или дополнительным инструментом для улучшения двигательных функций и уменьшения поведенческих расстройств у пациентов с черепно-мозговой травмой.

Рассеянный склероз

Рассеянный склероз — хроническое аутоиммунное заболевание, которое поражает миелиновые оболочки головного и спинного мозга с нейропсихиатрической симптоматикой; наиболее распространёнными симптомами являются тревога, депрессия и когнитивные нарушения. Вероятность когнитивных нарушений (памяти, исполнительных функций, внимания и скорости обработки информации) у пациентов с рассеянным склерозом составляет 45–70%. Депрессия, вызванная рассеянным склерозом, вдвое повышает риск суицида, поэтому крайне важно вмешаться на ранней стадии заболевания и свести к минимуму многочисленные последствия. Учитывая когнитивные и эмоциональные аспекты рассеянного склероза, необходимо дальнейшее совершенствование методов терапии [4].

Систематический обзор с метаанализом J. Zhang и соавт. [4] является первым в области изучения эффективности реабилитации на основе ВР в отношении когнитивных функций и настроения у пациентов с клиническим диагнозом рассеянного склероза, независимо от пола и длительности заболевания. Монреальская когнитивная оценка (Montreal Cognitive Assessment, MoCA), тесты на пространственное запоминание (Spatial Recall Test, SPART), на немедленное вспоминание и отсроченное вспоминание показали улучшение по сравнению с контрольной группой с точки зрения глобальной когнитивной функции и зрительно-пространственных способностей. Не выявлено существенных различий в скорости обработки, внимании, рабочей памяти и депрессии. Индексы MoCA и SPART показали, что 8-недельное реабилитационное вмешательство на основе ВР оказалось эффективнее в улучшении глобальной когнитивной функции, немедленного и отсроченного вспоминания, зрительно-пространственных способностей у пациентов с рассеянным склерозом, чем ранее применявшиеся методики. Эффект был достигнут за счёт повышения мотивации и вовлечённости пациента в лечение.

Результаты метаанализа 10 РКИ [4] показывают, что реабилитация на основе ВР (иВР, ниВР или полумерсивная ВР, применяемые отдельно либо в сочетании с другими формами терапии) может улучшить настроение и когнитивные способности пациентов с рассеянным склерозом, в частности глобальную когнитивную функцию, немедленное и отсроченное воспроизведение, зрительно-пространственные способности, а также снизить тревожность. Однако эффективность реабилитации на основе ВР в улучшении скорости обработки, внимания, рабочей памяти и депрессии не подтверждается данными, полученными другими авторами (у пациентов с лёгкими когнитивными нарушениями тренировки в ВР оказали умеренное или сильное влияние на общие когнитивные, конструктивные и двигательные функции) [27]. Расхождения с результатами исследования [27] могут быть связаны со следующими причинами. Во-первых, у пациентов с рассеянным склерозом имеются другие симптомы, такие как боль и усталость. Во-вторых, рабочая память является более широким понятием, чем кратковременная память, и включает в себя способность хранить и обрабатывать информацию, что связано со скоростью обработки и вниманием. Высокоинтенсивное, повторяющееся и ориентированное на задачу обучение является отличительной чертой ВР в связи с тем, что ВР усиливает синаптическую пластичность, смягчает влияние атрофии серого вещества и других поражений мозга на скорость обработки информации и память. Реабилитация с помощью ВР стимулирует активацию системы зеркальных нейронов у пациентов с рассеянным склерозом, что приводит к кортикальным и субкортикальным изменениям,

а также к дополнительной стимуляции синаптической реорганизации и ремиелинизации в двигательных областях мозга, улучшает равновесие и когнитивные функции [12]. Виртуальная реальность может быть эффективной мотивирующей альтернативой традиционной реабилитации. В целом ВР положительно влияет на настроение и когнитивные способности пациентов с рассеянным склерозом, независимо от того, использовалась она отдельно или в сочетании с другими терапевтическими воздействиями. Ограничением метаанализа [4] является отсутствие в большинстве включённых РКИ данных последующего наблюдения, что затрудняет определение степени стойкости результатов лечения на основе ВР, поэтому интерпретировать их следует с осторожностью. Побочные эффекты и безопасность ВР также остаются неизвестными. Чтобы определить эффективность различных ВР и оптимальные параметры ВР-лечения рассеянного склероза, необходимы более обширные комплексные многоцентровые РКИ с более длительными периодами наблюдения.

По данным исследований групп M. Goffredo [28] и C. Pagliari [29], двигательная тренировка на основе VRRS, проводимая на дому у пациента посредством телекоммуникационных технологий, эффективнее традиционного лечения без использования каких-либо технологических устройств в улучшении статического и динамического равновесия и походки, тогда как никакой разницы между вмешательствами не продемонстрировано относительно односторонней ловкости рук (измеренной с помощью теста «Коробка и кубики») у пациентов с рассеянным склерозом [28].

Необходимо рассмотреть важный аспект, который может поставить под сомнение эффективность VRRS в лечении нейропсихологических дефицитов. В некоторых случаях получены противоречивые результаты воздействия на одну и ту же когнитивную функцию. Например, одно и то же исследование обнаруживает улучшение некоторых, но не всех показателей одной и той же нейропсихологической функции (тест с построением маршрута в исследовании R. De Luca и соавт. [25]). Таким образом, несмотря на признание эффективности VRRS в нейропсихологической реабилитации в целом, противоречивые результаты, касающиеся конкретных когнитивных функций и задач, в некоторых случаях ограничивают возможность делать однозначные выводы, в связи с чем рекомендации об использовании VRRS для лечения не могут быть экстраполированы на различные группы пациентов. Необходимы РКИ для изучения и подтверждения эффективности VRRS в реабилитации определённых неврологических и нейропсихологических функций при конкретных состояниях, чтобы на основе научных доказательств рекомендовать VRRS и теле-VRRS для повышения неврологического и нейропсихологического функционирования у конкретной группы пациентов [1].

Болезнь Паркинсона

ВР-технология доказала свою эффективность в когнитивной и двигательной реабилитации пациентов с болезнью Паркинсона. Система обучения по когнитивному и поведенческому восстановлению и соответствующее когнитивное приложение ВР могут тренировать память таких пациентов, исполнительные функции, внимание, логическое мышление и скорость мышления, тем самым укрепляя когнитивные функции с точки зрения исполнительных и визуально-пространственных способностей [5]. Виртуальная реальность в сочетании с традиционной физиотерапией может значительно уменьшить тремор покоя, ригидность, улучшить осанку, походку и медленные движения тела [30]. Неиммерсивные игры с упражнениями в ВР помогают пациентам с болезнью Паркинсона, особенно пациентам пожилого возраста, улучшить походку и равновесие [31].

При тяжёлой болезни Паркинсона контроль симптомов на поздних стадиях проблематичен. У пациентов наблюдается брадикинезия, определяемая как снижение скорости или амплитуды движений в сочетании с тремором покоя, ригидностью или обоими этими симптомами. На поздних стадиях заболевания часто присутствует постуральная нестабильность. Такие симптомы влияют на двигательные способности пациентов и качество их жизни. Фармакологическая терапия дофаминергическими препаратами (леводопа и агонисты дофамина) часто связана с долгосрочными осложнениями, такими как дискинезии и двигательные флуктуации, а также может усугубить немоторные симптомы паркинсонизма, такие как галлюцинации, когнитивные нарушения и ортостатическая гипотензия. Некоторые двигательные функции, включая походку и равновесие, обычно не отвечают на леводопу.

Глубокая стимуляция мозга доказала свою эффективность в улучшении качества жизни и уменьшении тремора, но не влияет на аксиальные расстройства, такие как застывание походки, постуральная неустойчивость, изменение осанки туловища и дизартрофония [32]. Благодаря ВР-технологии появилась возможность нового подхода к реабилитации. В этой развивающейся области реабилитации М. Нага и соавт. [9] разработали новый тип вмешательства, названный терапией соматоконгнитивной координации (ТСКК) для координации движений путём сосредоточения внимания на произвольном движении суставов, отличных от тех, которые предназначены для мобилизации. В трёхмесячном исследовании авторы оценивали безопасность и переносимость ТСКК с использованием иВР, а также результаты тестов для походки, функции руки, индекс оценки болезни Паркинсона и показатель функциональной независимости. Целью этих тестов была не оценка терапевтической эффективности, а обеспечение отсутствия пагубных последствий

ВР-ТСКК для физических функций пациентов с прогрессирующей тяжёлой болезнью Паркинсона. Этот аспект особенно важен, учитывая уязвимость исследуемой популяции. В среде иВР авторы сосредоточились на движениях суставов за пределами предполагаемого действия, которые они назвали суставной связанностью. Эта уникальная настройка ВР позволяет наблюдать спутанную соматоконгнитивную сеть действий, подобную спутанным нитям марионетки, что лишает её способности двигать одной частью своего тела. иВР-ТСКК проводили в сеансах по 20 минут трижды в неделю в течение 3 месяцев с упором на снижение суставной связанности во время выполнения задач. Во время ТСКК пациенты в сидячем положении попеременно дотягивались левой и правой рукой до статичных или падающих целей в виртуальном пространстве. Терапевт персонализировал задания в соответствии со способностями каждого пациента, а успешное взаимодействие подтверждалось мультисенсорной обратной связью — текстом, звуком и вибрацией. Этот метод имитирует смещение веса тела во время ходьбы и отражает стратегический подход к одновременному решению проблем походки и функций верхних конечностей у пациентов с прогрессирующей болезнью Паркинсона. Все участвующие пациенты хорошо адаптировались к ВР, и никто не выбыл из-за проблем с переносимостью, не наблюдалось никаких нежелательных явлений, вызванных ВР, и никакого ухудшения в результатах тестов. Все пациенты были удовлетворены своим участием в клиническом исследовании с использованием ВР [9]. Таким образом, ВР-ТСКК представляется хорошо переносимым вмешательством при тяжёлой форме болезни Паркинсона.

Систематический обзор с метаанализом 51 РКИ (2095 пациентов) по изучению эффективности ВР-терапии с полным аудиовизуальным погружением представили С.Е. Яу и соавт. [32]. Авторы продемонстрировали, что вмешательства на основе ВР могут значительно улучшить качество жизни, походку и параметры равновесия у пациентов с болезнью Паркинсона. Такие пациенты в 2 раза чаще падают и получают переломы, чем лица без болезни Паркинсона, поэтому восстановление равновесия и постуральной устойчивости имеет для них жизненно важное значение. Динамическое равновесие достигается и поддерживается посредством сложной сети сенсорных входов, включающих вестибулярные, слуховые и зрительные модальности. Эти входы интегрированы и взаимодействуют с планированием движений. Предполагается, что реабилитация в ВР как глобальное вмешательство стимулирует множество чувств одновременно, и, следовательно, интегральная система улучшает равновесие. Вмешательство с ВР-компонентом показало лучшие результаты в выполнении теста со вставанием со стула и ходьбой с отсчётом времени (timed up and go test, TUG) по сравнению с контролем, превзойдя

роботизированные и проприоцептивные вмешательства (такие как периферическая стимуляция) и лечебную физкультуру, значительно улучшило показатели шкалы равновесия, а также качество жизни по сравнению с контрольным вмешательством. Контролем служило то же вмешательство без ВР-компонента. По оценке двигательных результатов по шкале UPDRS (Unified Parkinson's Disease Rating Scale) все вмешательства имели схожую эффективность [32].

Таким образом, технология ВР может предоставить пациентам с болезнью Паркинсона безопасную и эффективную среду для тренировок и реабилитации. Поскольку двигательные функции могут зависеть от когнитивных способностей человека, вмешательства с ВР-компонентом, которые интегрируют двигательные и когнитивные аспекты, имеют потенциал для улучшения двигательных результатов реабилитации. Авторы считают необходимым изучить мультимодальный реабилитационный подход с использованием комбинации традиционных методов лечения (например, фармакотерапии) и технологических вмешательств. Исследования долгосрочных эффектов технологических вмешательств и их взаимодействия с традиционными методами помогут индивидуализировать лечение для различных двигательных подтипов болезни Паркинсона [32].

Хронические болевые синдромы

Хроническая боль оказывает глубокое влияние на независимость и качество жизни, особенно когда затрагивается функция верхней конечности. От хронической боли страдают 20–30% людей в мире. Хроническая мышечно-скелетная боль влияет на физическое, психологическое и социальное функционирование. Эффективный контроль боли в настоящее время считается центральным принципом медицинской помощи. Несмотря на это, боль часто не лечится, отчасти из-за опасений по поводу назначения опиоидов, которые эффективны при острой боли, но несут риск передозировки и привыкания [33]. Лечебная физкультура является хорошо известным нефармакологическим методом лечения хронической боли, оказывающим положительное влияние на интенсивность боли, физическую функцию, сон и качество жизни. Её дополнительные преимущества за счёт высвобождения эндорфинов, серотонина, дофамина и других «вознаграждающих» эндогенных химических веществ продемонстрированы у людей с хронической болью и депрессией [34]. Когда речь идёт о реабилитации пациентов, страдающих от боли, лечебная физкультура представляет для них долгий, трудный и утомительный процесс, в связи с чем необходимы новые подходы для увеличения переносимости физических упражнений, а также для повышения мотивации и удовлетворённости, поддержания психосоциального благополучия пациентов, у которых отсутствует мотивация выполнять упражнения. В этом отношении ВР

может стать полезным инструментом для смягчения терапевтических проблем.

В систематическом обзоре с метаанализом 25 РКИ с участием пациентов с хронической мышечно-скелетной болью Н.Н. Ло и соавт. [34] изучали влияние тренировок с использованием ВР на интенсивность боли, функциональную инвалидность и кинезиофобию. Международная классификация болезней 11-го пересмотра определяет хроническую мышечно-скелетную боль как боль, которая длится более 3 месяцев постоянно или периодически, включая региональную боль (суставы, конечности, спина или шея), дегенеративное состояние суставов (например, остеоартрит) и мышечно-скелетную боль, подпадающую под классификацию «хронической первичной боли». Хронической вторичной болью называется боль, которая воспринимается как симптом, вторичный по отношению к основному заболеванию [35]. Психологический статус измеряли по кинезиофобии — эмоциональному и когнитивному фактору, который приводит к неадаптивному поведению [36]. В контрольных группах используют лечебную физкультуру или физиотерапию. Результаты исследования показывают, что ВР-технологии облегчают хронические мышечно-скелетные боли. При болях в пояснице ниВР более эффективна для уменьшения симптомов непосредственно после курсового лечения и при динамическом наблюдении в течение 6 месяцев по сравнению с обычными тренировками. При хронической боли в спине тренировка с использованием ниВР превосходит обычную тренировку по показателям уменьшения интенсивности боли, инвалидности и кинезиофобии в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Размер эффекта для инвалидности был умеренным. В случае боли в шее иВР снизила интенсивность боли, в краткосрочной перспективе уменьшила инвалидность; значимых краткосрочных и среднесрочных эффектов на кинезиофобию не обнаружено. Для боли в колене доступна только ниВР. Статистически значимых различий между группами ниВР и контролем в отношении боли в колене и функции сустава не обнаружено во всех временных точках. Активная тренировка с использованием как ниВР, так и иВР уменьшает симптомы боли в спине и шее, но какая форма ВР эффективнее, осталось невыясненным. Положительной динамики использования ВР у пациентов с болевыми синдромами других локализаций, например, в плече, бедре, не обнаружено. Способность ВР, особенно игровых технологий с мотивационными и вознаграждающими элементами, уменьшать боль объясняется в основном активным отвлечением, которое уменьшает субъективное ощущение боли, тем не менее результаты показывают, что включение ВР в обычную активную тренировку помогает в лечении хронической мышечно-скелетной боли [34].

Сравнение клинической эффективности иВР и ниВР является сложной задачей, так как при хронической боли

в пояснице большинство исследователей использовали иВР, в то время как в исследованиях хронической боли в шее — иВР. Это связано с тем, что при боли в шее для анализа кинематики шейного отдела позвоночника, в отличие от болевого синдрома в спине, использовался головной дисплей. В большинстве исследований боли в спине были использованы готовые развлекательные игры ВР или виртуальные смоделированные среды. Новое иммерсивное терапевтическое программное обеспечение, направленное на создание присутствия, обучения и формирования привычек для лечения хронической боли в пояснице, расширяет возможности иВР в уменьшении боли у пациентов с хронической мышечно-скелетной болью [37]. Выводы Н.Н. Ло и соавт. [34] о влиянии ВР-терапии на снижение интенсивности хронической мышечно-скелетной боли подтверждаются в систематических обзорах других авторов [38–40]. Дальнейшие исследования с более длительным периодом наблюдением позволяют определить роль ВР с различными уровнями погружения в лечении болевых синдромов.

Виртуальная реальность, как и физические упражнения, позволяет уменьшить боль, избегая при этом рисков традиционной фармакотерапии. Когнитивная модуляция боли с помощью ВР возникла как нефармакологический метод снижения восприятия боли, ослабления когнитивных, эмоциональных и связанных с вниманием аспектов боли. Физические упражнения являются ещё одним нефармакологическим вмешательством с анальгетическим эффектом, центральным медиатором которого является симпатическая нервная система. Кратковременное симпатическое возбуждение является адаптивным ответом на боль и упражнения и оказывает положительное влияние, тогда как стойкая симпатическая активация усиливает болевое ощущение и хронизирует болевой синдром. Повышенная симпатическая активность распространена при хронической боли и может играть роль в поддержании гипералгезии при некоторых синдромах хронической боли. Сочетание упражнений и ВР представляет собой мультимодальный метод повышения переносимости боли, особенно при хронических болевых состояниях, когда нарушена нормальная физиология боли [41].

S.T. Rodriguez и соавт. [33] изучили аддитивный анальгетический эффект упражнений и ВР с целью оценить влияние упражнений в виртуальной среде на симпатическую активацию, восприятие и переносимость боли. Здоровые взрослые добровольцы были подвергнуты стандартизированному холодному прессорному тесту (помещение руки или предплечья в холодную воду — стимул, который вызывает медленно нарастающую боль слабой или умеренной интенсивности и прекращается добровольным отдергиванием конечности). Холодовой прессорный тест является устоявшимся методом создания контролируемых и повторяемых болевых стимулов в экспериментальной обстановке. Сравнивались две модальности ВР

в отношении скорости наступления болевой реакции на холодное воздействие: в первой пациенты движением головы сопровождали летающий объект взглядом, во второй использовалась езда на велосипеде. После ориентации в игровом процессе участники погружали руку в ледяную ванну (3–5°C) до момента наступления отчётливого болевого ощущения. Активность симпатической нервной системы косвенно оценивали по электропроводности кожи: в условиях обеих модальностей она увеличивалась с течением времени ($p < 0,0001$). Во всех временных точках у участников, выполнявших упражнения с ВР, отмечали более высокую симпатическую активность ($p < 0,0001$) и более высокие средние значения проводимости кожи ($p < 0,0001$). Вторичным результатом было влияние упражнений с поддержкой ВР на самооценку восприятия боли по шкале от 0 до 10 каждые 30 секунд во время холодного теста и сразу после того, как участник вынимал руку из ледяной ванны. Оценка боли «0» соответствовала полному отсутствию боли, а «10» — самой мучительной боли, какую можно себе представить. Между использованием обеих модальностей не было разницы в переносимости боли. Первоначально болевые ощущения усиливались при выполнении упражнений с ВР-поддержкой по сравнению с одной только ВР, но эта связь изменилась на противоположную в течение 4 минут: это означает, что упражнения могут повышать болевую чувствительность, но постоянная физическая активность в конечном итоге снижает восприятие боли. Снижение восприятия боли при выполнении упражнений с использованием ВР по сравнению с использованием только ВР указывает на то, что упражнения с использованием ВР могут быть полезным инструментом для контроля боли, хотя точный механизм этого эффекта неясен [33]. Симпатическая активность регистрировалась выше в условиях упражнений с ВР по сравнению с условиями только ВР на всех этапах исследования: эти результаты показывают, что боль вызывает стойкое увеличение симпатической активности, независимо от условий исследования, а упражнения вызывают относительное увеличение симпатической активности по сравнению с болью, ослабленной с помощью только ВР. Различий между условиями эксперимента в отношении переносимости боли не наблюдалось, что указывает на то, что снижение восприятия боли при упражнениях с ВР не всегда приводит к улучшению переносимости боли. Учитывая, что ВР и упражнения независимо друг от друга улучшают переносимость боли [42, 43], это неожиданное отсутствие эффекта может отражать эффект потолка для синергетической анальгезии с ВР и упражнениями [33].

Результаты эксперимента S.T. Rodriguez и соавт. [33] показывают, что добавление упражнений к ВР снижает болевую чувствительность после начального периода усиления боли. Упражнения с поддержкой ВР увеличили симпатическую активность и снизили восприятие боли

по сравнению с одной только ВР, что подтверждает их воздействие в качестве анальгезирующего вмешательства. Профиль риска, универсальность и доступность упражнений с поддержкой ВР особенно привлекательны по сравнению с фармакологическими анальгетиками. Этот нефармакологический мультимодальный подход к лечению боли может использоваться как в клинических, так и домашних условиях. Упражнения с поддержкой ВР для лечения хронической боли особенно привлекательны, поскольку пациенты могут получить пользу и от анальгезии, и от физической активности [41]. Помимо уменьшения боли, упражнения с поддержкой ВР предлагают пациентам такие преимущества, как улучшение результатов функциональной реабилитации, качества жизни и психологического благополучия.

Когнитивные расстройства

Когнитивные расстройства, также известные как нейрокогнитивные расстройства, могут прямо или косвенно, постоянно или временно влиять на функционирование когнитивно-нейронной и перцептивной систем, что приводит к различным поведенческим отклонениям и снижает качество жизни пациента. Лечение может помочь людям с когнитивными расстройствами сохранить свои умственные способности и навыки, смягчить последствия заболевания и выполнять свою работу более эффективно. Из-за распространённости когнитивных расстройств и проблем, связанных с медикаментозным лечением, возрос интерес к использованию нефармакологических методов, таких как технологии погружения в виртуальный мир. Представленная в публикациях [44, 45] образовательная программа на основе ВР интегрирует технологию ВР в обучение, внося положительный эмоциональный компонент. Используя компьютерные симуляции, ВР поощряет активное участие в процессе обучения. Игры на основе ВР также подразумевают использование технологии ВР для создания интерактивного игрового опыта, отдавая приоритет повествованию, игровому процессу и удовольствию. Имеющиеся данные показывают, что технология ВР может быть полезна для контроля и лечения когнитивных расстройств [44, 45]. Эта персонализированная динамичная терапия позволяет проводить целевые вмешательства на основе индивидуальных потребностей. Умеренное когнитивное нарушение, также называемое стадией преддеменции, является одним из наиболее распространённых когнитивных расстройств у пожилых людей. Когнитивные упражнения на основе ВР в сочетании с лечебной физкультурой способствуют укреплению здоровья мозга, когнитивных функций и физического здоровья у пожилых людей с преддеменцией [46]. Когнитивно-моторная реабилитация на основе ВР приводит к более значительному улучшению в областях визуально-пространственного восприятия, зрительно-моторной организации, ориентации, мыслительной деятельности

и внимания, чем вмешательства традиционной когнитивной реабилитации [5].

Систематический обзор К. Moulaei и соавт. [47] с метаанализом исследований влияния образовательных программ и игр на основе ВР на когнитивные функции установил, что ВР статистически значимо уменьшала когнитивные нарушения у пациентов с когнитивными расстройствами. Игры с включением ВР оказали большее влияние на уменьшение когнитивных нарушений по сравнению с другими видами когнитивных тренировок. Включённые в анализ исследования продемонстрировали, что игры и образовательные программы на основе ВР могут улучшить ориентацию, визуально-пространственное восприятие, зрительно-моторную организацию, мыслительную деятельность и функции внимания/концентрации у людей с когнитивными расстройствами. Погружая пациентов в виртуальные учебные сценарии, ВР делает процесс обучения более увлекательным и способствует приверженности лечению, даёт пациентам с лёгкими когнитивными нарушениями чувство безопасности и удовлетворения, снижает усталость, тревожность и стресс по сравнению с альтернативными методами обучения (такими как методы с ручкой и бумагой). Вовлечение пациентов с когнитивными нарушениями в иммерсивные и интерактивные виртуальные среды стимулирует у них когнитивные процессы, позволяет легче и безопаснее воспринимать сенсорные стимулы, улучшает понимание и усвоение функциональных навыков в процессе обучения благодаря способности ВР поддерживать различные функции коры, стимулируя и активируя метаболизм мозга, увеличивая мозговой кровоток и высвобождение нейротрансмиттеров [47].

Исследование Z. Liu и соавт. [48] продемонстрировало значительные улучшения результатов когнитивных тестов MoCA, TMT-A (Trail-Making Test-A, прокладывание маршрута), DSST (Digit Symbol Substitution Test, замена цифровых символов), DST (Digital Span Test, способность запоминать последовательность чисел), VFT (Verbal Fluency Test, беглость речи) и модифицированного индекса Бартел (Modified Barthel Index, степень зависимости в повседневной жизни) после использования игрово-головолок на основе ВР пациентами, перенёвшими инсульт. Игры в ВР предлагают пользователям захватывающий опыт с помощью интерактивных экранов, сенсорных контроллеров, датчиков движения, голосовых уведомлений, физической вибрации, панорамного обзора и увлекательных элементов игрового процесса, таких как сбор очков и защита от врагов. Эти аспекты способствуют привлекательности, чувству соревнования и азарту, которые пользователи получают от игр в ВР [49]. Именно по этой причине игры оказались особенно эффективным подходом, превзойдя традиционные программы когнитивной тренировки в улучшении когнитивных способностей пациентов. Ощущение присутствия

в таких местах, как велосипедные или лыжные трассы, футбольные поля, или участие в приключенческих играх особенно привлекательно для пользователей с когнитивными расстройствами [47].

В исследовании К. Moulaei и соавт. [45] установлена важность конкретных элементов дизайна, таких как иммерсивный характер VR, для оптимизации их воздействия на пациентов и достижения положительных результатов. В отличие от обычных когнитивных упражнений, которые могут казаться монотонными, игры в VR предлагают динамичную среду, которая естественным образом удерживает внимание участника. Эта повышенная вовлечённость очень важна, так как постоянная концентрация и интерес потенциально способствуют повышению нейронной пластичности в когнитивных областях, стимулируя более широкий спектр когнитивных функций. Удовольствие и чувство прогресса, испытываемые во время игры, индуцируют выброс нейротрансмиттеров, таких как дофамин, связанных с системами мотивации и вознаграждения в мозге. Эта нейрохимическая реакция создаёт положительную обратную связь, побуждая вкладывать больше времени и усилий в игровую деятельность. Увеличение времени, проведённого за играми, может привести к более длительному вовлечению, способствуя в конечном итоге более надёжным когнитивным улучшениям.

Результаты исследования К. Moulaei и соавт. [47] подчёркивают потенциал VR как ценного инструмента в стратегиях когнитивной реабилитации и преимущества включения игровых вмешательств для достижения оптимальных когнитивных результатов. Идентификация типа вмешательства как значимого модератора указывает на необходимость тонкого подхода к оценке и внедрению вмешательств на основе VR и даёт теоретическую основу персонализированных стратегий когнитивной реабилитации.

ДРУГИЕ ОБЛАСТИ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Посттравматическое стрессовое расстройство

Посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) — распространённое инвалидирующее психиатрическое расстройство, которое характеризуется навязчивыми мыслями и воспоминаниями, избеганием стимулов, связанных с травмой, перевозбуждением, нарушением настроения и когнитивных способностей. Основной дефицит при ПТСР концептуализирован как патологическое обусловливание страха с невозможностью вспомнить его угасание. Исследования ПТСР выявили отклонения в нейронных цепях, включая гиперактивность в миндалевидном теле и дорсальной передней поясной коре — областях, которые способствуют реакциям страха, а также гипоактивность

в вентромедиальной префронтальной коре — области, которая подавляет реакции страха. Считается, что при ПТСР нарушен нисходящий контроль миндалевидного тела со стороны вентромедиальной префронтальной коры и других областей головного мозга, которые у здоровых людей поддерживают безопасное обучение и память. Усиление ингибиторной модуляции миндалевидного тела со стороны вентромедиальной префронтальной коры может улучшить симптомы ПТСР [50].

Известные варианты лечения ПТСР включают когнитивно-поведенческую терапию, учитывающую характер травмы, и фармакотерапию селективными ингибиторами обратного захвата серотонина или норадреналина, имеют ограниченную эффективность и проблемы, связанные с доступностью и побочными эффектами [51]. Из-за отсутствия ответа на стандартную терапию и побочных эффектов преимущественно эмоциональной природы (сильного негативного аффекта, усиления размышлений о негативных автобиографических воспоминаниях, неправильного толкования нейтральных или неоднозначных событий как негативных) до 50% пациентов прекращают лечение [50].

Аномалии в угасании страха и воспоминаний о нём являются основным компонентом ПТСР. Доказано, что неинвазивная ТМС мозга постоянным током может уменьшить симптомы ПТСР. Слабые электрические токи, применяемые к коже головы, способствуют нейронной активности и угасанию страха. У ветеранов с ПТСР применяемая во время синаптической консолидации (перевод воспоминаний из кратковременной памяти в долговременную форму) после обучения угасанию страха транскраниальная магнитная стимуляция может усилить консолидацию угасания [52].

Одним из новых инструментов манипулирования контекстным представлением в исследованиях и лечении психического здоровья является VR. Комбинированная терапия ТМС вентромедиальной префронтальной коры, разработанная для доставки слабых электрических токов и деполяризации нейронов в контексте VR, эффективно уменьшает симптомы ПТСР [50].

Рандомизированное контролируемое исследование применения транскраниальной магнитной стимуляции в комбинации с виртуальной реальностью (ТМС+VR) у участников — ветеранов армии США с посттравматическим стрессовым расстройством (ПТСР), связанным с боевыми действиями, показало, что активная стимуляция (6 сеансов по 25 минут в день ТМС при силе тока 2 мА в сочетании с VR в течение 2 недель) привела к снижению психофизиологического возбуждения, улучшению самооценки состояния пациентами и ускорению психофизиологического привыкания к VR-терапии ($p < 0,001$). Платцебо-группа (ложная магнитная стимуляция с силой тока 10 мкА в течение 15 мс каждые 550 мс + VR) не продемонстрировала аналогичных эффектов [53]. Последующие

сеансы стимуляции через 3 месяца показали клинически значимое улучшение социального и профессионального функционирования и самооценки снижения ПТСР. Психиатрический рецидив ПТСР определяется как любая попытка суицида или суицидальные мысли, стационарное лечение или обращение в психиатрическую скорую помощь. Используемая система ВР обеспечивает визуальное, слуховое, тактильное и обонятельное погружение в виртуальные боевые условия. Участникам исследования была представлена серия виртуальных событий, которая начиналась с езды в автомобиле с защитой от мин и засад, с нарастающей интенсивностью воздействия: перестрелка вдали, взрыв баллистической ракеты, пролёт военного вертолёта, засада на дороге 1, засада на дороге 2, самодельное взрывное устройство (СВУ) справа на расстоянии 40 м, засада на дороге, СВУ справа на расстоянии 40 м, СВУ слева на расстоянии 30 м, засада на мосту, СВУ впереди с поворотом ведущего автомобиля. Участники повторяли один и тот же 8-минутный сценарий ВР 3 раза с интервалом 30 секунд, чтобы проверить переносимость этого опыта, и могли остановиться в любой момент [50]. В течение года после лечения не было ни одного случая смерти от суицида или других причин. Участники исследования, рандомизированные в группу плацебо, были более склонны к рецидиву (Odd Ratio 3): 23,5% пациентов рецидивировали в группе активной стимуляции (ТМС+ВР) и 76,5% — в группе сравнения (ложная стимуляция ТМС+ВР). В активной группе 69% пациентов не показали никаких изменений в приёме лекарств, 27% уменьшили приём лекарств, а 1 (3,8%) — увеличил. В группе плацебо у 50% не было изменений, 14% дозу лекарств уменьшили, а 36% — увеличили. Оценка качества жизни клиницистами показала неспецифическое улучшение с течением времени. Социальное и профессиональное функционирование значительно улучшилось через 3 месяца в группе активной ТМС по сравнению с группой ложной ТМС. Это означает, что активная ТМС усиливает привыкание между сеансами и внутри них у пациентов обеих групп. Побочные эффекты были лёгкими и не различались между группами по частоте. Таким образом, статистически значимые положительные результаты получены по нескольким направлениям: в группе активной стимуляции наблюдался более низкий уровень рецидивов и сокращение фармакотерапии психиатрическими препаратами. Ограничением этой работы является отсутствие отдельного контроля ВР и определение рецидива, основанное на индикаторах более тяжёлого психиатрического заболевания, поэтому менее значительные изменения могли быть упущены, тем не менее полученные результаты демонстрируют реальные доказательства того, что ТМС+ВР-терапия может обеспечить кратко- и долгосрочные преимущества для пациентов с ПТСР. Данное РКИ показало, что 6 сеансов активной ТМС+ВР в течение 2–3 недель превосходят фиктивную ТМС+ВР в уменьшении тяжести симптомов

ПТСР, связанного с военными действиями. Эффекты были клинически значимыми и увеличивались с течением времени. Пациенты в группе активной ТМС испытали усиленное психофизиологическое привыкание к сигналам ВР из зоны боевых действий по сравнению с группой ложной ТМС, что соответствует лучшей реконсолидации. Симптомы ПТСР продолжали уменьшаться в течение месяца после лечения активной ТМС+ВР [50, 53].

В публикации [54] подтверждается эффективность и безопасность использования ТМС у военных ветеранов с симптомами депрессии и ПТСР на основе данных многоцентровых широкомасштабных клинических исследований.

Большинство психофизиологических изменений происходит в начале терапии, поэтому продление курса ТМС+ВР вряд ли принесёт пользу лицам, у которых не произошли физиологические изменения. Следует отметить, что ВР-вмешательство не было индивидуализированным, оно было разработано для включения широко распространённых травматических переживаний, чтобы стандартизировать метод. Это РКИ демонстрирует потенциал комбинированной стимуляции мозга и контекстного контроля, который подчёркивает инновационные возможности данных технологий [50].

Хроническая обструктивная болезнь лёгких

Терапию на основе ВР предложено включить в программы традиционной лёгочной реабилитации для лечения хронической обструктивной болезни лёгких в качестве дополнительного инструмента.

В систематическом обзоре с метаанализом E. Obrero-Gaitán и соавт. [6] синтезировали все имеющиеся на сегодняшний день доказательства влияния ВР в сочетании с лёгочной реабилитацией и в качестве самостоятельной терапии на улучшение показателей функции внешнего дыхания и функциональной мобильности у пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких. Большинство включённых в метаанализ исследований (80%) использовали ниВР, поэтому результаты метаанализа актуальны именно для этого типа вмешательства, который включает игровой компонент, уменьшающий субъективное восприятие усилий и повышающий мотивацию. Анализ подгрупп обнаружил удивительно большой эффект сочетания ниВР с лёгочной реабилитацией в улучшении функциональной мобильности (тест на 6-минутную ходьбу) и функции лёгких (оцениваемой по объёму форсированного выдоха) у пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких любой степени тяжести.

Классические программы лёгочной реабилитации состоят из тренировочных упражнений, которые часто воспринимаются как монотонные или демотивирующие. Вмешательство на основе ВР может решить эту проблему, предлагая терапию, которая является активной, увлекательной и адаптированной к индивидуальным потребностям, включая интенсивность и продолжительность

упражнений. ВР считается безопасной терапией, удобной для использования в качестве домашнего тренинга (посредством телекоммуникаций) у пациентов с хроническими респираторными заболеваниями, включая хроническую обструктивную болезнь лёгких. ВР-системы, используемые в реабилитации, просты в транспортировке и могут быть установлены дома. Забавные и приятные впечатления, предоставляемые видеоиграми, или экзергеймами (exergame-терапия — игровая терапия для улучшения функциональной подвижности), используемыми в ВР, повышают мотивацию и приверженность пациента терапии. Высокий уровень приверженности к комбинированной терапии может объяснить более выраженное улучшение результатов по сравнению с лёгочной реабилитацией [6]. Преимущества включения ВР-компонента в лёгочную реабилитацию подтверждают аналогичные выводы систематического обзора и метаанализа РКИ, выполненного ранее [55].

С помощью лёгочной реабилитации на основе ВР можно добиться улучшения функции лёгких, когнитивных функций, повышения переносимости физических нагрузок и эффективности лекарств, уменьшить симптомы одышки у пожилых пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких и лёгкой когнитивной дисфункцией [5].

Онкология

Онкологический диагноз является тяжёлым, психотравмирующим событием, вызывающим тревожность, депрессию, плохое качество сна и снижение физической активности, и справиться с болезнью очень сложно. Уровень психического стресса сразу после постановки диагноза обычно очень высок [56]. Разнообразие симптомов означает необходимость охватить гораздо более широкую симптоматику, чем сама злокачественная опухоль. Важным фактором является физическая активность до заболевания и во время реабилитации. Преимущества упражнений для повышения качества жизни, снижения уровня тревожности и депрессии у пациентов с раком описаны в систематическом обзоре М. Sun и соавт. [57]. Учёные сходятся во мнении, что имеют значение количество и интенсивность физической активности.

Технологическая революция способствовала внедрению ВР в лечение онкологических пациентов, а также в процессы преабилитации и реабилитации. Технологии и ВР способны влиять на сознание пациента, что в сочетании с психотерапией улучшает психофизическое состояние во время лечения, позволяет получать положительные терапевтические эффекты с нулевым или низким риском побочных эффектов лечения по сравнению с другими терапевтическими методами. О. Czech и соавт. [58] провели РКИ с целью оценить эффективность ВР в улучшении психического состояния и качества сна, а также повышении физической активности у пациентов

с диагнозом рака молочной железы. Экспериментальное вмешательство состояло из 8 сеансов ВР, запрограммированных на успокоение и улучшение настроения. Сеансы продолжительностью 15 минут переносили пациентов в виртуальный сад с терапевтическим аудиокомментарием. Состояние виртуального сада улучшалось от сеанса к сеансу, начиная с бесцветного сада, что приводило к восстановлению цветов, энергии и красоты на последнем сеансе. Кроме того, все сеансы включали двигательные задания (создание виртуальной мандалы, разной для каждого сеанса; уход за садом; дыхательные упражнения). ВР-устройство состояло из специальных очков и контроллера (манипулятора), подключённого к компьютеру. Полное погружение обеспечивает интенсивные визуальные, слуховые и кинестетические стимулы, помогает пациентам использовать свои психологические ресурсы и мотивирует их более активно участвовать в процессе реабилитации. В виртуальном саду используются символы и метафоры, среди которых самым важным является Сад Возрождения, который символизирует выздоровление пациента. Благодаря вовлечению пациента в возделывание сада виртуальная земля начинает гудеть жизнью. Сила метафорической коммуникации заключается в обходе сопротивления пациента. Психотерапия по методу М. Эриксона позволяет пациенту проходить процессы самовосстановления, которые продлевают терапевтический эффект. Эффекты оценивали с помощью шкалы психической адаптации к раку (mini-Mental Adjustment to Cancer scale, mini-MAC), международного опросника физической активности (International Physical Activity Questionnaire, IPAQ), Питтсбургского индекса качества сна (Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI) и модифицированной госпитальной шкалы тревоги и депрессии (modified Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS-M) в четырёх временных точках: до вмешательства (T0), через 2 недели после вмешательства (T1), через 6 (T2) и 10 (T3) недель после измерения T0. Анализ выявил в экспериментальной группе значимые различия между временными точками T0-T2 и T0-T3 в отношении стиля совладания с болезнью (конструктивный против деструктивного), ходьбы, физической активности, качества и продолжительности сна, депрессии, тревожности и уровня агрессии. Результаты исследования показывают улучшение психофизического состояния онкологических больных в период преабилитации и терапии, снижение уровня стресса, повышение эффективности терапии и участия пациента в процессе выздоровления.

Кардиология

Кардиологические процедуры часто вызывают боль и тревожность у пациентов, что отрицательно сказывается на выздоровлении. Систематический обзор с метаанализом РКИ показал, что ВР статистически значимо снижает тревожность, но не интенсивность боли

по сравнению со стандартным лечением. Пациенты, включённые в исследование, существенно различались по типам, продолжительности и частоте использования технологий VR, но, несмотря на гетерогенность данных, VR эффективно снижала уровень тревожности у пациентов, перенёвших кардиологические процедуры [59]. Медицинские услуги по кардиопульмональной реабилитации успешно осуществляются с использованием технологии VR как вспомогательного инструмента в программах кардиореабилитации. VR-реабилитация способствует повышению приверженности лечению и удовлетворённости медицинской помощью у пациентов с ишемической болезнью сердца II стадии по сравнению с группой традиционного лечения. Игровая VR-терапия улучшает показатели частоты сердечных сокращений, частоты дыхания и воспринимаемой нагрузки во время и после выполнения упражнений у пациентов, проходящих кардиореабилитацию [5].

Реабилитация на основе VR может обеспечить персонализацию вмешательства, повысить толерантность к физическим нагрузкам и снизить тревожность и симптомы депрессии, что было продемонстрировано у госпитализированных больных в период пандемии COVID-19. После стационарного лечения когнитивная реабилитация в сочетании с VR может с успехом проводиться в рамках дистанционно-контролируемой реабилитации [60].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение различных программ реабилитации на основе VR сопровождается улучшением неврологического статуса пациентов: увеличиваются сила и объём движений, улучшается координация, облегчается боль. Большинство исследований демонстрируют, что нейромоторная реабилитация на основе VR (отдельно или в комбинации с традиционными методами реабилитации) может быть более эффективной, чем традиционное лечение, и что иммерсивная VR является перспективным реабилитационным инструментом, особенно для лиц, перенёвших инсульт, и лиц со сложным региональным болевым синдромом. Продemonстрирована эффективность очного когнитивного тренинга на основе VR в улучшении нейропсихологических функций. Что касается эффективности вмешательства VR, реализованного путём телекоммуникации, исследования показывают, что оно сопоставимо по эффекту с традиционными методами восстановительного лечения.

Реабилитация требует персонализированных планов лечения, разработанных с учётом состояния и прогресса пациента. Приложения для VR-реабилитации должны быть гибкими и адаптируемыми под разнообразные потребности и возможности пациентов. Для обеспечения максимальной эффективности должны быть доступны регулировка уровней сложности и ориентация

на определённые двигательные навыки. Интеграция технологий виртуальной реальности в традиционные методы реабилитации представляет собой сложный междисциплинарный процесс, требующий тесного взаимодействия между специалистами в области медицинской реабилитации и инженерами-разработчиками. Это необходимо для обеспечения «бесшовного» внедрения VR в существующие клинические подходы, а также для разработки стандартизированных протоколов и методических рекомендаций по применению технологии в реабилитационной практике. В большинстве случаев исследовательские команды создают индивидуальную иммерсивную виртуальную среду, которую можно адаптировать к предполагаемому варианту использования с точки зрения требований реабилитологов и потребностей пациентов. Расширение сферы применения VR требует оценки пригодности и долгосрочных эффектов для различных возрастных групп, уровней инвалидности и клинических сценариев.

Избегание потенциальных побочных эффектов должно быть приоритетом в протоколах VR-реабилитации для предотвращения негативных последствий для пациентов. Для более широкого внедрения иммерсивной VR в качестве инструмента реабилитации исследователям необходима возможность оценки, сравнения и устранения потенциальных неблагоприятных эффектов реабилитации на основе погружения в VR, что требует разработки протоколов VR, адаптированных к конкретным патологиям, и учёт количественных показателей киберболезни. Важно сопоставлять количественные показатели с клиническими результатами для мониторинга результатов и анализа динамики возможностей пациентов в ходе VR-реабилитации.

Применение VR в восстановительном лечении представляет собой достаточно безопасную перспективную технологию, позволяющую персонализировать и «дозировать» реабилитационные мероприятия в соответствии с потребностями и возможностями пациентов, а применяемая геймификация повышает приверженность пациентов лечению, тем не менее авторы исследований отмечают необходимость проведения рандомизированных контролируемых исследований для стандартизации используемых VR-технологий, оптимизации протоколов и анализа долгосрочных эффектов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Г. Щербак, А.С. Голота — написание текста статьи; Д.А. Вологжанин, С.В. Макаренко — написание и редактирование текста статьи; Т.А. Камилова — поисково-аналитическая работа, написание, обсуждение и редактирование текста 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.

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 проведении исследования и создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступность данных. Все материалы, использованные в этой работе, доступны из источников, указанных в ссылках.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. S.G. Shcherbak, A.S. Golota: manuscript writing; D.A. Vologzhanin, S.V. Makarenko: revision and manuscript writing;

T.A. Kamilova: search and analytical work, writing and editing of the manuscript. All authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests. The authors declare that during the last three years they have not had any relationships, activities or interests (commercial or non-commercial) related to third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In conducting the research and creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. All materials used in this work are available from the sources indicated in the references.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Macchitella L, Spaccavento S, Arigliani M, et al. A narrative review of the use of a cutting-edge virtual reality rehabilitation technology in neurological and neuropsychological rehabilitation. *NeuroRehabil.* 2023;53(4):439–457. doi: 10.3233/NRE-230066
- Wang L, Zhang H, Ai H, Liu Y. Effects of virtual reality rehabilitation after spinal cord injury: A systematic review and meta-analysis. *J Neuroeng Rehabil.* 2024;21(1):191. doi: 10.1186/s12984-024-01492-w
- Ceradini M, Losanno E, Micera S, et al. Immersive VR for upper-extremity rehabilitation in patients with neurological disorders: A scoping review. *J Neuroeng Rehabil.* 2024;21(1):75. doi: 10.1186/s12984-024-01367-0
- Zhang J, Wu M, Li J, et al. Effects of virtual reality-based rehabilitation on cognitive function and mood in multiple sclerosis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Mult Scler Relat Disord.* 2024;87:105643. doi: 10.1016/j.msard.2024.105643
- Wang C, Kong J, Qi H. Areas of research focus and trends in the research on the application of VR in rehabilitation medicine. *Healthcare (Basel).* 2023;11(14):2056. doi: 10.3390/healthcare11142056
- Obrero-Gaitán E, Chau-Cubero CY, Lomas-Vega R, et al. Effectiveness of virtual reality-based therapy in pulmonary rehabilitation of chronic obstructive pulmonary disease: A systematic review with meta-analysis. *Heart Lung.* 2024;65:1–10. doi: 10.1016/j.hrtlng.2024.01.011
- Takei K, Morita S, Watanabe Y. Acceptability of physical therapy combined with nintendo ring fit adventure exergame for geriatric hospitalized patients. *Games Health J.* 2024;13(1):33–39. doi: 10.1089/g4h.2023.0009
- Drazich BF, McPherson R, Gorman EF, et al. In too deep? A systematic literature review of fully-immersive virtual reality and cybersickness among older adults. *J Am Geriatr Soc.* 2023;71(12):3906–3915. doi: 10.1111/jgs.18553
- Hara M, Murakawa Y, Wagatsuma T, et al. Feasibility of somato-cognitive coordination therapy using virtual reality for patients with advanced severe Parkinson's disease. *J Parkinsons Dis.* 2024;14(4):895–898. doi: 10.3233/JPD-240011
- Bailey RB. Highlighting hybridization: A case report of virtual reality-augmented interventions to improve chronic post-stroke recovery. *Medicine (Baltimore).* 2022;101(25):e29357. doi: 10.1097/MD.00000000000029357
- Contrada M, Arcuri F, Tonin P, et al. Stroke telerehabilitation in Calabria: A health technology assessment. *Front Neurol.* 2022;12:777608. doi: 10.3389/fneur.2021.777608
- Luque-Moreno C, Kiper P, Solís-Marcos I, et al. Virtual reality and physiotherapy in post-stroke functional re-education of the lower extremity: A controlled clinical trial on a new approach. *J Pers Med.* 2021;11(11):1210. doi: 10.3390/jpm11111210
- Duan H, Jing Y, Li Y, et al. Rehabilitation treatment of multiple sclerosis. *Front Immunol.* 2023;14:1168821. doi: 10.3389/fimmu.2023.1168821
- Liu Y, Lin R, Tian X, et al. Effects of VR task-oriented training combined with rTMS on balance function and brain plasticity in stroke patients: a randomized controlled trial study protocol. *Trials.* 2024;25(1):702. doi: 10.1186/s13063-024-08519-6
- Heinrich C, Morkisch N, Langlotz T, et al. Feasibility and psychophysical effects of immersive virtual reality-based mirror therapy. *J Neuroeng Rehabil.* 2022;19(1):107. doi: 10.1186/s12984-022-01086-4
- Kamm CP, Blättler R, Kueng R, Vanbellingen T. Feasibility and usability of a new home-based immersive virtual reality headset-based dexterity training in multiple sclerosis. *Mult Scler Relat Disord.* 2023;71:104525. doi: 10.1016/j.msard.2023.104525
- Gebreheat G, Antonopoulos N, Porter-Armstrong A. Application of immersive virtual reality mirror therapy for upper limb rehabilitation after stroke: A scoping review. *Neurol Sci.* 2024;45(9):4173–4184. doi: 10.1007/s10072-024-07543-3
- Demeco A, Zola L, Frizziero A, et al. Immersive virtual reality in post-stroke rehabilitation: A systematic review. *Sensors (Basel).* 2023;23(3):1712. doi: 10.3390/s23031712
- Mekbib DB, Zhao Z, Wang J, et al. Proactive motor functional recovery following immersive virtual reality-based limb mirroring therapy in patients with subacute stroke. *Neurotherapeutics.* 2020;17(4):1919–1930. doi: 10.1007/s13311-020-00882-x
- Chang WK, Lim H, Park SH, et al. Effect of immersive virtual mirror visual feedback on Mu suppression and coherence in motor and parietal cortex in stroke. *Sci Rep.* 2023;13(1):12514. doi: 10.1038/s41598-023-38749-8
- Da Silva Jaques E, Figueiredo AI, Schiavo A, et al. Conventional mirror therapy versus immersive virtual reality mirror therapy: The perceived usability after stroke. *Stroke Res Treat.* 2023;2023:5080699. doi: 10.1155/2023/5080699
- De Luca R, Leonardi S, Maresca G, et al. Virtual reality as a new tool for the rehabilitation of post-stroke patients with chronic aphasia: An exploratory study. *Aphasiology.* 2023;37(2):249–259. doi: 10.1080/02687038.2021.1998882
- Bu X, Ng PH, Tong Y, et al. A mobile-based virtual reality speech rehabilitation app for patients with aphasia after stroke: Development and pilot usability study. *JMIR Serious Games.* 2022;10(2):e30196. doi: 10.2196/30196
- De Luca R, Bonanno M, Rifici C, et al. Does non-immersive virtual reality improve attention processes in severe traumatic brain injury? Encouraging data from a pilot study. *Brain Sci.* 2022;12(9):1211. doi: 10.3390/brainsci12091211
- De Luca R, Bonanno M, Marra A, et al. Can virtual reality cognitive rehabilitation improve executive functioning and coping strategies in traumatic brain injury? *Brain Sci.* 2023;13(4):578. doi: 10.3390/brainsci13040578

26. Calabrò RS, Bonanno M, Torregrossa W, et al. Benefits of telerehabilitation for patients with severe acquired brain injury: Promising results from a multicenter randomized controlled trial using nonimmersive virtual reality. *J Med Internet Res*. 2023;25:e45458. doi: 10.2196/45458
27. Papaioannou T, Voinescu A, Petrini K, Stanton Fraser D. Efficacy and moderators of virtual reality for cognitive training in people with dementia and mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *J Alzheimers Dis*. 2022;88(4):1341–1370. doi: 10.3233/JAD-210672
28. Goffredo M, Pagliari C, Turolla A, et al.; RIN_TR_Group. Non-immersive virtual reality telerehabilitation system improves postural balance in people with chronic neurological diseases. *J Clin Med*. 2023;12(9):3178. doi: 10.3390/jcm12093178
29. Pagliari C, Di Tella S, Jonsdottir J, et al. Effects of home-based virtual reality telerehabilitation system in people with multiple sclerosis: A randomized controlled trial. *J Telemed Telecare*. 2024;30(2):344–355. doi: 10.1177/1357633X211054839
30. Kashif M, Ahmad A, Bandpei MA, et al. A randomized controlled trial of motor imagery combined with virtual reality techniques in patients with Parkinson's disease. *J Pers Med*. 2022;12(3):450. doi: 10.3390/jpm12030450
31. Sarasso E, Gardoni A, Tettamanti A, et al. Virtual reality balance training to improve balance and mobility in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *J Neurol*. 2022;269(4):1873–1888. doi: 10.1007/s00415-021-10857-3
32. Yau CE, Ho EC, Ong NY, et al. Innovative technology-based interventions in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *Ann Clin Transl Neurol*. 2024;11(10):2548–2562. doi: 10.1002/acn3.52160
33. Rodriguez ST, Makarewicz N, Wang EY, et al. Virtual reality facilitated exercise increases sympathetic activity and reduces pain perception: A randomized crossover study. *Am J Phys Med Rehabil*. 2024;104(1):51–57. doi: 10.1097/PHM.0000000000002550
34. Lo HH, Zhu M, Zou Z, et al. Immersive and nonimmersive virtual reality-assisted active training in chronic musculoskeletal pain: Systematic review and meta-analysis. *Med Internet Res*. 2024;26:e48787. doi: 10.2196/48787
35. Nicholas M, Vlaeyen JW, Rief W, et al.; IASP Taskforce for the Classification of Chronic Pain. The IASP classification of chronic pain for ICD-11: Chronic primary pain. *Pain*. 2019;160(1):28–37. doi: 10.1097/j.pain.0000000000001390
36. Van Bogaert W, Coppieters I, Kregel J, et al. Influence of baseline kinesiophobia levels on treatment outcome in people with chronic spinal pain. *Phys Ther*. 2021;101(6):pzab076. doi: 10.1093/ptj/pzab076.6145902
37. Maddox T, Sparks CY, Oldstone L, et al. Perspective: the promise of virtual reality as an immersive therapeutic. *J Med Ext Real*. 2024;1(1):13–20. doi: 10.1089/jmxr.2023.0003
38. Guo Q, Zhang L, Gui C, et al. Virtual reality intervention for patients with neck pain: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Med Internet Res*. 2023;25:e38256. doi: 10.2196/38256
39. Kantha P, Lin J, Hsu W. The effects of interactive virtual reality in patients with chronic musculoskeletal disorders: A systematic review and meta-analysis. *Games Health J*. 2023;12(1):1–12. doi: 10.1089/g4h.2022.0088
40. Brea-Gómez B, Laguna-González A, Pérez-Gisbert L, et al. Virtual reality based rehabilitation in adults with chronic neck pain: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Virtual Real*. 2024;28(2):1–31. doi: 10.1007/s10055-024-00979-0
41. Simons LE, Hess CW, Choate ES, et al. Virtual reality-augmented physiotherapy for chronic pain in youth: Protocol for a randomized controlled trial enhanced with a single-case experimental design. *JMIR Res Protoc*. 2022;11:e40705. doi: 10.2196/40705
42. Neiman NR, Falkson SR, Rodriguez ST, et al. Quantifying virtual reality pain modulation in healthy volunteers: A randomized, crossover study. *J Clin Anesth*. 2022;80:110876. doi: 10.1016/j.jclinane.2022.110876
43. Senarath ID, Chen KK, Weerasekara I, de Zoete RM. Exercise-induced hypoalgesic effects of different types of physical exercise in individuals with neck pain: A systematic review and meta-analysis. *Pain Pract*. 2023;23(1):110–122. doi: 10.1111/papr.13150
44. Shahmoradi L, Rezayi S. Cognitive rehabilitation in people with autism spectrum disorder: A systematic review of emerging virtual reality-based approaches. *J Neuroeng Rehabil*. 2022;19(1):91. doi: 10.1186/s12984-022-01069-5
45. Moulaei K, Bahaadinbeigy K, Haghdoost A, et al. An analysis of clinical outcomes and essential parameters for designing effective games for upper limb rehabilitation: A scoping review. *Health Sci Rep*. 2023;6(5):e1255. doi: 10.1002/hsr2.1255
46. Yang JG, Thapa N, Park HJ, et al. Virtual reality and exercise training enhance brain, cognitive, and physical health in older adults with mild cognitive impairment. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(20):13300. doi: 10.3390/ijerph192013300
47. Moulaei K, Sheikhtaheri A, Haghdoost A, et al. Efficacy of virtual reality-based training programs and games on the improvement of cognitive disorders in patients: A systematic review and meta-analysis. *BMC Psychiatry*. 2024;24(1):116. doi: 10.1186/s12888-024-05563-z
48. Liu Z, He Z, Yuan J, et al. Application of immersive virtual-reality-based puzzle games in elderly patients with post-stroke cognitive impairment: A pilot study. *Brain Sci*. 2022;13(1):79. doi: 10.3390/brainsci13010079
49. Serafin S, Adjorlu A, Percy-Smith LM. A review of virtual reality for individuals with hearing impairments. *Multimodal Technol Interact*. 2023;7(4):36. doi: 10.3390/mti7040036
50. Van 't Wout-Frank M, Arulpragasam AR, Faucher C, et al. Virtual reality and transcranial direct current stimulation for posttraumatic stress disorder: A randomized clinical trial. *JAMA Psychiatry*. 2024;81(5):437–446. doi: 10.1001/jamapsychiatry.2023.5661
51. Schnurr PP, Hamblen JL, Wolf J, et al. The management of posttraumatic stress disorder and acute stress disorder: Synopsis of the 2023 U.S. Department of veterans affairs and U.S. Department of defense clinical practice guideline. *Ann Intern Med*. 2024;177(3):363–374. doi: 10.7326/M23-2757
52. Van 't Wout M, Longo SM, Reddy MK, et al. Transcranial direct current stimulation may modulate extinction memory in posttraumatic stress disorder. *Brain Behav*. 2017;7(5):e00681. doi: 10.1002/brb3.681
53. Philip NS, Brettler K, Greenberg BD, et al. One year clinical outcomes after transcranial direct current stimulation and virtual reality for posttraumatic stress disorder. *Brain Stimul*. 2024;17(4):896–898. doi: 10.1016/j.brs.2024.07.016
54. Madore MR, Kozel FA, Williams LM, et al. Prefrontal transcranial magnetic stimulation for depression in US military veterans: A naturalistic cohort study in the veterans health administration. *J Affect Disord*. 2022;297:671–678. doi: 10.1016/j.jad.2021.10.025
55. Patsaki I, Avgeri V, Rigoulia T, et al. Benefits from incorporating virtual reality in pulmonary rehabilitation of COPD patients: A systematic review and meta-analysis. *Adv Respir Med*. 2023;91(4):324–336. doi: 10.3390/arm91040026
56. Czech O, Matkowski R, Skórniak J, Malicka I. Psychological and physical well-being in women diagnosed with breast cancer: A comprehensive study of anxiety, depression, sleep quality, physical activity, and sociodemographic factors. *Med Sci Monit*. 2024;30:e943490. doi: 10.12659/MSM.943490
57. Sun M, Liu C, Lu Y, et al. Effects of physical activity on quality of life, anxiety and depression in breast cancer survivors: A systematic review and meta-analysis. *Asian Nurs Res (Korean Soc Nurs Sci)*. 2023;17(5):276–285. doi: 10.1016/j.anr.2023.11.001
58. Czech O, Kowaluk A, Ściepuro T, et al. Effects of immersive virtual therapy as a method supporting the psychological and physical well-being of women with a breast cancer diagnosis: A randomized rial. *Curr Oncol*. 2024;31(10):6419–6432. doi: 10.3390/curroncol31100477
59. Micheluzzi V, Burrai F, Casula M, et al. Effectiveness of virtual reality on pain and anxiety in patients undergoing cardiac procedures: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Curr Probl Cardiol*. 2024;49(5):102532. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2024.102532
60. Rutkowski S, Bogacz K, Czech O, et al. Effectiveness of an inpatient virtual reality-based pulmonary rehabilitation program among COVID-19 patients on symptoms of anxiety, depression and quality of life: Preliminary results from a randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(24):16980. doi: 10.3390/ijerph192416980

ОБ АВТОРАХ

* **Голота Александр Сергеевич**, канд. мед. наук, доцент;
адрес: Россия, 197706, Санкт-Петербург, г. Сестрорецк,
ул. Борисова, д. 9, лит. Б;
ORCID: 0000-0002-5632-3963;
eLibrary SPIN: 7234-7870;
e-mail: golotaa@yahoo.com

Щербак Сергей Григорьевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-5036-1259;
eLibrary SPIN: 1537-9822;
e-mail: b40@zdrav.spb.ru

Вологжанин Дмитрий Александрович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-1176-794X;
eLibrary SPIN: 7922-7302;
e-mail: volog@bk.ru

Макаренко Станислав Вячеславович;
ORCID: 0000-0002-1595-6668;
eLibrary SPIN: 8114-3984;
e-mail: st.makarenko@gmail.com

Камилова Татьяна Аскарровна, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0001-6360-132X;
eLibrary SPIN: 2922-4404;
e-mail: kamilovaspb@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Aleksandr S. Golota**, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;
address: 9B Borisova st, Sestroretsk, Saint Petersburg,
Russia, 197706;
ORCID: 0000-0002-5632-3963;
eLibrary SPIN: 7234-7870;
e-mail: golotaa@yahoo.com

Sergey G. Scherbak, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-5036-1259;
eLibrary SPIN: 1537-9822;
e-mail: b40@zdrav.spb.ru

Dmitry A. Vologzhanin, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-1176-794X;
eLibrary SPIN: 7922-7302;
e-mail: volog@bk.ru

Stanislav V. Makarenko;
ORCID: 0000-0002-1595-6668;
eLibrary SPIN: 8114-3984;
e-mail: st.makarenko@gmail.com

Tatyana A. Kamilova, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0001-6360-132X;
eLibrary SPIN: 2922-4404;
e-mail: kamilovaspb@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab683401>

EDN: ZLPOEM

Интервальная гипокси-гиперокситерапия как метод лечения пациентов в хроническом критическом состоянии, обусловленном тяжёлым повреждением головного мозга

А.А. Ильина^{1, 2}, М.В. Петрова^{1, 2}, А.В. Гречко^{1, 2}, Д.В. Ильин¹, Г.К. Спирина³¹ Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия;² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия;³ АсФор Групп, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Термин «хроническое критическое состояние» впервые введён в 1985 году исследователями медицинского факультета Стэнфордского университета в статье с провокационным заголовком «Спасти или дать умереть?». Авторы описали категорию пациентов, выделяющуюся среди общей популяции больных отделений реанимации и интенсивной терапии. Эти пациенты, получившие полный спектр интенсивной терапии, не погибали, но и не достигали выздоровления в течение недель, месяцев или даже лет после острого критического события. Вместе с тем исследователи заложили основу для дальнейшего изучения этого феномена.

По данным отечественных и зарубежных источников, пациенты в хроническом критическом состоянии составляют 5–20% от общего числа больных в реанимационных отделениях. Несмотря на интенсивное лечение и реабилитационные мероприятия, у большинства таких пациентов со временем развиваются нарушения гомеостаза и осложнения, приводящие к полиорганной недостаточности и летальному исходу.

В данной статье группа авторов представила опыт применения интервальной гипокси-гипероксической терапии в реабилитации пациента с хроническим нарушением сознания в хроническом критическом состоянии. В условиях реанимационного отделения на базе Научно-исследовательского института реабилитологии им. проф. Пряникова И.В. ФГБНУ «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии» пациенту был проведён двухнедельный курс терапии. Использование дозированных гипоксических тренировок способствовало улучшению адаптационных возможностей его организма и в рамках комплексной реабилитации привело к регрессу неврологического дефицита. Представленный клинический случай наглядно показывает, что внедрение интервальной гипокси-гиперокситерапии в лечебно-реабилитационный процесс на этапе пребывания пациентов в условиях реанимации обладает определённым потенциалом.

Ключевые слова: клинический случай; хроническое критическое состояние; хроническое нарушение сознания; интервальная гипокси-гиперокситерапия; реабилитация в реанимации; гипоксия.

Как цитировать:

Ильина А.А., Петрова М.В., Гречко А.В., Ильин Д.В., Спирина Г.К. Интервальная гипокси-гиперокситерапия как метод лечения пациентов в хроническом критическом состоянии, обусловленном тяжёлым повреждением головного мозга // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. 154–163. DOI: 10.36425/rehab683401 EDN: ZLPOEM

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab683401>

EDN: ZLPOEM

Interval Hypoxia-Hyperoxia Therapy as a Method of Treating Patients with Chronic Critical Illness Caused by Severe Brain Damage

Anna A. Ilina^{1, 2}, Marina V. Petrova^{1, 2}, Andrey V. Grechko^{1, 2}, Dmitri V. Ilin¹, Galina K. Spirina³¹ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, Russia;² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia;³ AsFor Group, Moscow, Russia

ABSTRACT

The term “chronic critical illness” was first coined in 1985 by researchers at Stanford University School of Medicine in an article with the provocative headline “Save or let die?” The authors described a unique category of patients that stood out among the general population of patients in intensive care units. These patients, who received a full range of intensive care, did not die, but also did not achieve recovery for weeks, months, or even years after an acute Injury. This research opened doors for further study.

National and foreign sources show that patients with chronic critical illness comprise 5–20% of intensive care unit patients. Despite intensive treatment and rehabilitation measures, most of these patients eventually develop homeostasis disorders and complications, leading to multiple organ failure and death.

This article presents an intermittent hypoxia-hyperoxia therapy case study for a patient with the chronic disorder of consciousness. The patient completed two weeks of intensive care therapy at the Scientific Research Institute of rehabilitation named after Prof. Pryanikova I.V. of the Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology. Metered-dose intermittent hypoxia-hyperoxia therapy training improved the patient's adaptation and reduced neurological deficits as a part of comprehensive rehabilitation.

Intermittent hypoxic-hyperoxia therapy shows potential in the intensive care unit patient treatment and in rehabilitation.

Keywords: case report; chronic critical illness; chronic impaired consciousness; interval hypoxic-hyperoxic therapy; rehabilitation in intensive care; hypoxia.

To cite this article:

Ilina AA, Petrova MV, Grechko AV, Ilin DV, Spirina GK. Interval Hypoxia-Hyperoxia Therapy as a Method of Treating Patients with Chronic Critical Illness Caused by Severe Brain Damage. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):154–163. DOI: 10.36425/rehab683401 EDN: ZLPOEM

Список сокращений

ИГТТ — интервальная гипокси-гипероксическая терапия
ЧДД — частота дыхательных движений
ЧСС — частота сердечных сокращений
CRS-R (Coma Recovery Scale-Revised) — русифицированная версия пересмотренной шкалы восстановления после комы

FOUR (Full Outline of UnResponsiveness) — шкала оценки уровня сознания у нейропациентов
SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) — система оценки тяжести органной недостаточности у пациентов в отделении реанимации и интенсивной терапии

АКТУАЛЬНОСТЬ

Хроническое критическое состояние — термин, прочно вошедший в практику современной анестезиолого-реанимационной службы Российской Федерации [1, 2]. Во всём мире медицинские мультидисциплинарные команды стремятся повысить качество жизни пациентов в хроническом критическом состоянии, внедряя новые методы лечения и реабилитации, начиная с пребывания пациентов на реанимационной койке [3].

Хроническое критическое состояние характеризуется комплексом тяжёлых нарушений, включая качественные и количественные расстройства сознания; длительную дыхательную недостаточность и зависимость от искусственной вентиляции лёгких; нарушения метаболизма, нейроэндокринной, психической и иммунной функций; персистирующую инфекцию и полиорганную дисфункцию, способствующие развитию внутрибольничных осложнений [4].

Критические эпизоды нестабильности делают пациентов зависимыми на долгие месяцы и даже годы от высококвалифицированной интенсивной помощи. Основными причинами развития хронического критического состояния являются тяжёлые черепно-мозговые травмы, острые нарушения мозгового кровообращения, аноксические поражения головного мозга и тяжёлое течение персистирующей инфекции с полиорганной дисфункцией. По данным исследований, хроническое критическое состояние развивается у 5–20% пациентов реанимационных отделений [2].

Отсутствие чётких критериев и систематизации представляет большую проблему в оптимизации лечения и реабилитации пациентов данной категории. Несмотря на относительную малочисленность данной группы в процентном соотношении от общего количества пациентов отделений реанимации, она является самой затратной в материальном плане, а также требует привлечения значительного количества квалифицированных трудовых ресурсов. В этой связи динамично проводится пересмотр подходов в лечении и реабилитации пациентов в хроническом критическом состоянии, целью которых является экономия ресурсов, финансов с получением лучших результатов лечения.

В условиях высокой ресурсоёмкости лечения пациентов в хроническом критическом состоянии активно разрабатываются новые подходы к терапии и реабилитации. Их

главная цель — повышение эффективности лечебно-реабилитационных мероприятий с одновременным снижением финансовых и человеческих затрат [5]. Актуальность изучения этой группы обусловлена увеличением числа таких больных, ростом нагрузки на системы здравоохранения и необходимостью разработки новых стратегий лечения и реабилитации, включая инновационные методы, например, интервальную гипокси-гипероксическую терапию (ИГТТ).

Интервальная гипокси-гипероксическая терапия — хорошо зарекомендовавший себя метод, применяемый в неврологии, дерматологии, терапии, кардиологии и спортивной медицине [6]. На базе Научно-исследовательского института реабилитологии им. проф. Пряникова И.В. ФГБНУ «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии» (ФНКЦ РР) методика внедрена в практику реанимационных отделений. Решение о внедрении одобрено этическим комитетом.

По данным различных источников литературы, ИГТТ способствует значительному улучшению общего соматического статуса пациента, регрессу когнитивно-мнестических расстройств и неврологического дефицита. Метод активирует нейро- и синаптогенез, стимулирует нейропластичность, ускоряет ангиогенез, улучшает хемо- и барорефлекторную реактивность, нормализует вегетативную регуляцию, а также устраняет дисбаланс функциональных систем за счёт стимуляции антиоксидантной и иммунной систем [7].

Сеансы ИГТТ проводятся при помощи аппарата нормобарической гипокситерапии ReOxy (Битмос ГмБХ, Германия). Аппарат состоит из кислородного концентратора, гипоксикатора, дыхательного контура, сенсорного дисплея, панели управления на корпусе аппарата, а также пульсоксиметра, обеспечивающего биологическую обратную связь от пациента посредством непрерывного мониторинга частоты пульса и сатурации (SpO₂) во время процедуры. В России ReOxy зарегистрирован Росздравнадзором как медицинское оборудование, установка для дыхательной терапии (регистрационное удостоверение РЗН 2014/1486 от 20.03.2014¹).

¹ Сертификационный центр «Невасерт» [Интернет]. Регистрационное удостоверение на медицинское изделие РЗН 2014/1486. Режим доступа: <https://nevacert.ru/reestr/med-reestr/rzn-2014-1486-34810?ysclid=mbrfnlnk0147872726>

Принцип метода ИГГТ заключается в чередовании кратковременных эпизодов системной гипоксии и умеренной гипероксии. Специалистами ФНКЦ РР разработан алгоритм проведения сеансов ИГГТ у пациентов реанимационного профиля с учётом их индивидуальных особенностей, течения заболевания, имеющихся осложнений и проводимой респираторной поддержки. Курс терапии длится 15 дней. Через дыхательный контур пациенту подаётся азотно-кислородная смесь с переменным содержанием кислорода (от 11% до 40%) в интервальном режиме [8]. Процедура включает 7–9 циклов гипоксии-гипероксии:

- гипоксическая фаза: подача смеси с поэтапным снижением содержания кислорода с 15% до 11% в течение 1–4 минут;
- гипероксическая фаза: подача смеси с содержанием кислорода 35–40% в течение 1–4 минут.

Эффективность процедуры определяется не только степенью и длительностью тканевой гипоксии, выступающей в качестве стрессорного и тренирующего стимула, но и чередованием в рамках одной процедуры коротких периодов гипоксии и восстановительных фаз реоксигенации [9, 10].

На примере клинического случая пациента в хроническом критическом состоянии с глубоким нарушением сознания в статье продемонстрированы эффективность и безопасность курсового применения дозированных гипоксических тренировок с достижением регресса неврологического дефицита вплоть до восстановления ясного сознания.

ОПИСАНИЕ СЛУЧАЯ

О пациенте

Пациент Л., 35 лет, поступил в ФНКЦ РР для продолжения лечебно-реабилитационных мероприятий.

Анамнез болезни. Месяц назад пациент был госпитализирован в Центральную районную больницу в состоянии комы в результате отравления неизвестным веществом. На догоспитальном и госпитальном этапах отмечались выраженные нарушения внешнего дыхания и угнетение сознания, что потребовало проведения продлённой искусственной вентиляции лёгких. По мере регресса дыхательной недостаточности пациент был поэтапно отлучён от аппаратной респираторной поддержки и переведён на самостоятельное дыхание через трахеостомическую трубку. По данным компьютерной томографии головного мозга выявлены признаки диффузной кортикальной атрофии, энцефалопатии и кистозно-глиозных изменений вещества мозга. После стабилизации состояния в вегетативном состоянии направлен в специализированное отделение ФНКЦ РР для продолжения лечебных и реабилитационных мероприятий.

При поступлении в ФНКЦ РР через 30 дней после критического инцидента диагностировано вегетативное состояние. Клиническая картина: отсутствие фиксации взгляда, пассивное положение в постели в приданной

позе, невозможность контакта. Собственная речь и артикуляция отсутствуют, элементарные инструкции не выполняются, реакция на осмотр отсутствует. Сохранены содружественная реакция зрачков на свет и глоточный рефлекс. Тетраплегия. Дыхание самостоятельное через естественные дыхательные пути атмосферным воздухом, гемодинамические показатели стабильны. По данным компьютерной томографии головного мозга выявлены сливные участки кистозно-глиозных изменений обоих полушарий. В связи с выраженной дисфагией проводилось энтеральное питание через назогастральный зонд. Мочеиспускание через уретральный катетер вследствие нарушения функции тазовых органов, нейрогенного мочевого пузыря.

Клинический диагноз

Аноксическое поражение головного мозга. Осложнение: вегетативное состояние. Тетраплегия. Бульбарные нарушения. Нарушение функции тазовых органов. Декубитальная язва крестца III стадии. Сопутствующий: Ангиопатия сетчатки обоих глаз. Трахеостомия. Эрозивная гастропатия. Хроническая язва луковицы двенадцатиперстной кишки.

Лечение

Основные направления реабилитации включали восстановление когнитивных функций, коррекцию дисфагии, профилактику вторичных осложнений и повышение качества жизни.

На фоне общепринятых алгоритмов лечения с первых суток начали применение метода ИГГТ. Всего проведено 15 процедур длительностью 40 минут каждая, выполняемых ежедневно. Контроль состояния осуществлялся посредством мультипараметрического мониторинга витальных функций, включая частоту сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление, частоту дыхательных движений (ЧДД), сатурацию (saturation of peripheral oxygen, SpO₂) и данные электрокардиомониторинга.

Для оценки неврологического статуса использовали следующие шкалы:

- русифицированную версию шкалы восстановления после комы (Coma Recovery Scale-Revised, CRS-R);
- шкалу оценки уровня сознания у нейропациентов (Full Outline of UnResponsiveness, FOUR);
- систему оценки тяжести органной недостаточности у пациентов в отделении реанимации и интенсивной терапии (Sequential Organ Failure Assessment, SOFA).

При проведении первой процедуры ИГГТ (рис. 1) неврологический статус пациента оставался прежним: вегетативное состояние, гемодинамические показатели пациента стабильны (ЧСС min/max 83/90 уд./мин; артериальное давление до, во время и после проведения процедуры 119/85, 124/91 и 120/87 мм рт.ст. соответственно); данных за ишемию миокарда, по данным электрокардиомониторинга, не получено, что подтверждено лабораторно (маркеры повреждения миокарда в пределах референтных

значений); дыхательной недостаточности не отмечалось (ЧДД от 14 до 20 в минуту за время проведения ИГГТ); сатурация во время цикла гипоксии 89%. FOUR 12 баллов, SOFA 4 балла, CRS-R 7 баллов.

К 7-му дню исследования (после 6 процедур ИГГТ) отмечена положительная динамика неврологического статуса — повышение уровня сознания до минимального плюс (+). Пациент фиксировал взгляд, следил за осмотром, переводил взгляд в сторону оклика. Появилась шёпотная бранная речь в ответ на болевой стимул.

В связи с удовлетворительным состоянием и адаптацией к гипоксии параметры ИГГТ были скорректированы: фракция вдыхаемого кислорода (fraction of inspired oxygen, FiO_2) во время цикла гипоксии снижена до 12%. Гемодинамические показатели оставались стабильными: ЧСС 81–95 уд./мин; артериальное давление до, во время и после проведения процедуры 131/87, 128/90 и 132/96 мм рт.ст. соответственно; по данным электрокардиомониторинга признаков ишемии миокарда не выявлено, что подтверждено лабораторными данными (маркеры повреждения миокарда в пределах референтных значений).

Дыхательная функция стабильна: ЧДД 16–20 в минуту; минимальная сатурация во время цикла гипоксии 88%. Дыхательной недостаточности не отмечено. Результаты оценки по шкалам: FOUR 13 баллов, SOFA 3 балла, CRS-R 14 баллов.

На 10-й день (после 9 процедур ИГГТ) пациент находился в состоянии ясного сознания, предпринимал попытки выполнения элементарных инструкций, на поставленные вопросы отвечал верно, но с запозданием. Частично дезориентирован. Быстро истощался. Процедуры ИГГТ пациент переносил удовлетворительно без отрицательной динамики в соматическом и неврологическом статусе.

На 15-й день (после 14 процедур ИГГТ) пациент находился в ясном сознании, критично к своему состоянию, полностью ориентирован, общался с родственниками посредством видеосвязи, интересовался текущими событиями в окружающем мире. Сохранялся астенический синдром. В связи с отсутствием нарушений глотания пациент был переведён на питание *per os*. Сохранялась плегия в нижних конечностях. Движения правой верхней конечностью не ограничены, при движении левой рукой отмечалась умеренная спастика. Отмечена положительная динамика в лечении декубитальной язвы крестца.

К 15-й процедуре ИГГТ удалось достичь минимальных значений фракции вдыхаемого кислорода на вдохе во время цикла гипоксии в связи с адаптацией пациента к гипоксии (уменьшена фракция вдыхаемого кислорода на вдохе во время цикла гипоксии до 11%). Гемодинамические показатели пациента оставались стабильны (ЧСС min/max 78/90 уд./мин; артериальное давление до, во время и после проведения процедуры 120/84, 122/86 и 127/90 мм рт.ст. соответственно; по данным электрокардиомониторинга данных за ишемию миокарда не получено, что подтверждено лабораторно: маркеры



Рис. 1. Проведение интервальной гипоксии-гипероксической терапии пациенту в вегетативном состоянии.

Fig. 1. Conducting intermittent hypoxia-hyperoxia therapy of a patient in a vegetative state.

повреждения миокарда в пределах референтных значений), дыхательной недостаточности не отмечалось (ЧДД от 16 до 20 в минуту за время проведения ИГГТ), при этом значение сатурации во время цикла гипоксии 88%. FOUR 15 баллов, SOFA 2 балла, CRS-R 21 балл.

Динамика соматического и неврологического статуса

По завершении курса из 15 процедур ИГГТ зафиксирована выраженная положительная динамика (рис. 2). Оценка по шкалам CRS-R и FOUR показала регресс церебральной недостаточности, уменьшение неврологического дефицита и повышение уровня сознания.

По шкале SOFA проводилась оценка общего состояния пациента, нуждающегося в интенсивной терапии. На момент поступления показатель составлял 4 балла, к 15-му дню курса снизился до 0 баллов, что свидетельствует о полном регрессе органной дисфункции.

В результате лечебных и реабилитационных мероприятий отмечался положительный эффект в соматическом и неврологическом статусе в виде регресса неврологического дефицита (уровень сознания повысился с уровня ареактивного бодрствования до ясного сознания с лёгким когнитивным дефицитом, появилась речевая

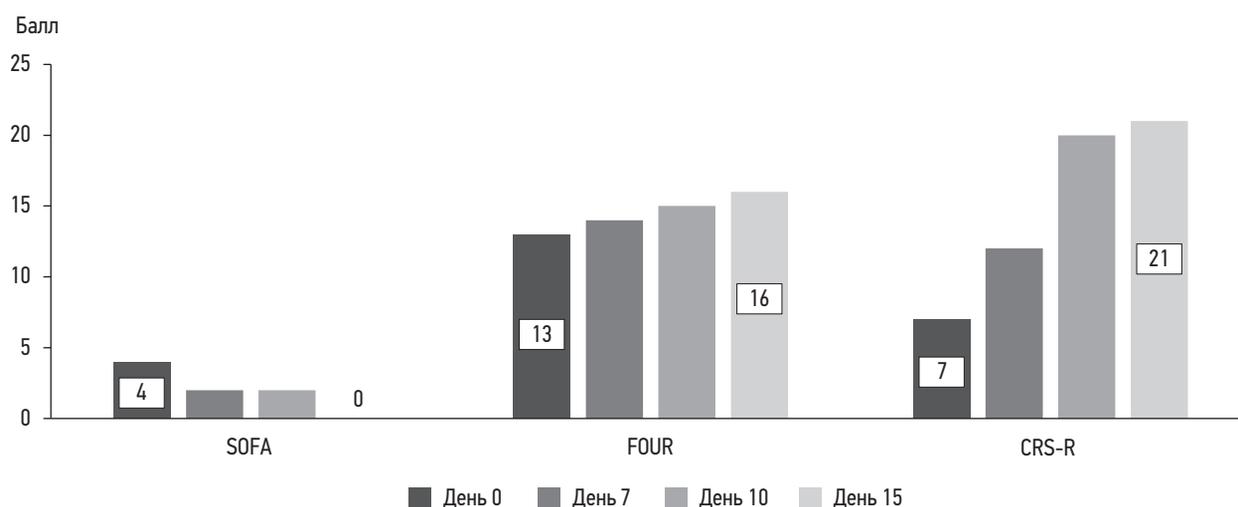


Рис. 2. Динамика оценки состояния по шкалам.

Fig. 2. The dynamics of the patient's condition according to scales.

продукция); восстановления функции глотания (пациент переведён с зондового питания на основной вариант диеты); эпителизации декубитальной язвы крестца; регрессии азотемии, в том числе скорректированы водно-электролитные показатели крови; прочие показатели достигли референтных значений.

Динамика результатов лабораторных исследований

По данным биохимического анализа крови (табл. 1) сохранялась умеренная белково-энергетическая недостаточность. Показатели общего белка и альбумина оставались

Таблица 1. Биохимический анализ крови в динамике

Table 1. Biochemical blood test. Dynamics

Показатели крови	Койко-день						
	1-й	3-й	5-й	7-й	10-й	15-й	30-й
Билирубин общий, мкмоль/л	8,2	9,4	-	8,4	6,8	7,4	9,5
Общий белок, г/л	58,9	55,0	-	52,5	52,5	52,0	56,0
Альбумин, г/л	27,20	26,80	-	28,00	26,40	27,20	31,10
Мочевина, ммоль/л	53,0	28,5	20,4	8,7	4,6	2,4	4,8
Креатинин, мкмоль/л	297,8	125,2	90,6	58,9	54,1	43,7	53,0
Глюкоза, ммоль/л	9,97	5,84	6,20	5,50	5,07	4,87	5,09
Кальций общий, ммоль/л	1,97	2,02	-	2,09	2,11	2,05	-
Калий, ммоль/л	5,4	4,3	4,3	3,6	4,0	3,5	4,1
Натрий, ммоль/л	157,2	160,5	155,7	144,5	142,5	139,6	140,9
Хлор, ммоль/л	120,5	132,4	122,1	107,7	106,7	104,4	105,8
АЛТ, Ед/л	72,0	70,3	81,2	67,5	75,8	97,7	135,5
АСТ, Ед/л	92,3	83,8	90,8	58,1	58,6	63,9	78,0
Щелочная фосфатаза, Ед/л	120,3	109,6	-	116,2	137,0	181,4	221,3
Альфа-амилаза, Ед/л	155,4	96,6	-	103,2	82,0	51,8	40,9
С-реактивный белок, мг/л	17,96	1,00	1,25	1,39	20,72	15,68	-
КФК, Ед/л	624,6	-	265,4	105,2	-	-	-
Прокальцитонин, нг/мл	0,3	-	-	-	-	-	-

Примечание. АЛТ — аланинаминотрансфераза; АСТ — аспаратаминотрансфераза; КФК — креатинфосфокиназа.

Note. АЛТ, alanine aminotransferase; АСТ, aspartate aminotransferase; КФК, creatine phosphokinase.

относительно стабильны за время лечения в условиях реанимации. При поступлении обращали на себя внимание повышенные показатели продуктов азотистого обмена (мочевина 53, креатинин 297,8), на фоне проводимой консервативной терапии без применения методов экстракорпоральной детоксикации в динамике удалось достичь референтных значений показателей.

Отмечена нормализация показателей углеводного обмена, свидетельствующая об улучшении метаболических процессов у пациента. При поступлении отмечались значительные гиперкалиемия (5,4), гипернатриемия (157),

гиперхлоремия (120,5), на фоне проводимой корригирующей инфузионной терапии к 7-му койко-дню отмечен регресс водно-электролитных нарушений. Показатели трансаминаз оставались умеренно повышенными весь период лечения.

В клиническом анализе крови (табл. 2) маркеры воспаления (С-реактивный белок, лейкоцитоз, нейтрофильный сдвиг) в динамике достигли референтных значений.

Результаты микробиологического исследования. В биологических материалах (кровь, моча, мокрота), взятых при поступлении (табл. 3), обнаружена *Pseudomonas*

Таблица 2. Клинический анализ крови в динамике

Table 2. Clinical blood test. Dynamics

Показатели крови	Койко-день					
	1-й	3-й	5-й	7-й	15-й	30-й
Лейкоциты, 10^9 /л	16,50	11,90	9,20	10,70	7,50	5,80
Эритроциты, 10^{12} /л	4,93	3,93	4,13	3,89	3,56	3,42
Гемоглобин, г/л	162,0	129,0	136,0	129,0	115,0	108,0
Гематокрит, %	49,7	39,7	40,6	37,8	35,0	32,7
Средний объем эритроцита, фл	100,9	101,0	98,4	97,2	98,2	95,8
Среднее содержание гемоглобина в эритроците, пг	32,8	32,8	32,9	33,1	32,2	31,7
Средняя концентрация гемоглобина в эритроците, г/л	325	325	334	340	328	331
Ширина распределения эритроцитов по объему (CV), %	12,80	12,90	12,80	11,90	12,50	12,90
Тромбоциты, 10^9 /л	235,0	214,0	193,0	246,0	314,0	308,0
Нейтрофилы, %	72,20	72,30	66,70	77,00	76,90	67,60
Нейтрофилы абс., 10^9 /л	11,90	8,60	6,10	8,30	5,80	3,9
Лимфоциты, %	19,30	20,70	21,30	13,60	15,50	23,50
Лимфоциты абс., 10^9 /л	3,20	2,50	2,00	1,50	1,20	1,40
Моноциты, %	8,2	6,2	7,1	7,6	5,8	7,2
Моноциты абс., 10^9 /л	1,40	0,70	0,60	0,80	0,40	0,40
Эозинофилы, %	0,0	0,4	4,2	1,1	0,4	0,4
Эозинофилы абс., 10^9 /л	0,00	0,00	0,40	0,10	0,00	0,00
Базофилы, %	0,3	0,4	0,7	0,7	1,4	1,3

Таблица 3. Результаты микробиологических исследований во время пребывания в стационаре

Table 3. Results of microbiological studies

Койко-день	Результат
15-й	Эндотрахеальный аспират (бронхосмыв): <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 10^3 КОЕ/мл. Панрезистентность (нечувствительность) к амикацину (MIC 16)
1-й	Эндотрахеальный аспират: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 10^5 КОЕ/мл. Панрезистентность (нечувствительность) к амикацину (MIC 16)
1-й	Кровь венозная из периферической вены: рост микроорганизмов не обнаружен
1-й	Моча: в 1 мл рост микроорганизмов не обнаружен

Примечание. MIC — минимальная подавляющая концентрация.

Note. MIC, minimum inhibitory concentration.

aeruginosa 10^5 КОЕ/мл. Исследование аспирата на 15-й койко-день показало снижение КОЕ/мл до 10^3 .

Исход и результаты последующего наблюдения

На 21-й день госпитализации в соматически стабильном состоянии пациент был переведён в профильное отделение для продолжения курса лечения и реабилитационных мероприятий. Впоследствии выписан для продолжения лечебно-реабилитационных мероприятий в лечебную организацию по месту жительства.

Спустя два года пациент был лишён первой группы инвалидности (рис. 3), ему оформлена третья группа инвалидности. Пациент почти в полном объёме обслуживает себя. Нуждается в контроле, в связи с чем проживает с родственниками. Сохраняется когнитивно-мнестический дефицит.

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный клинический случай подтверждает безопасность интервальной гипоксии-гипероксической терапии и её потенциальную эффективность при персонализированном подходе к дозированной гипоксии у пациентов реанимационного профиля.



Рис. 3. Пациент спустя два года лечебно-реабилитационных мероприятий.

Fig. 3. The patient after 2 years of treatment and rehabilitation measures.

В периоды дозированной гипоксии активируются гипоксией индуцируемые факторы, что стимулирует экспрессию генов, кодирующих синтез защитных белков, таких как эритропоэтин, сосудистые факторы роста и гликолитические ферменты. Во время реоксигенации происходит умеренная продукция активных форм кислорода, которые выступают сигнальными молекулами, что запускает активацию антиоксидантных клеточных систем и усиление активности транскрипционных факторов (HIF и др.).

Применение процедур интервальной гипоксии/нормоксии или гипоксии/гипероксии способствует улучшению когнитивных функций и памяти у пациентов с нейродегенеративными изменениями мозга. Эффекты обусловлены активацией продукции нейротрофических факторов, снижением системного воспаления, улучшением мозгового кровотока [9–11].

Полученные положительные результаты свидетельствуют о целесообразности применения ИГГТ на более ранних этапах лечения хронических нарушений сознания и болевого синдрома, включая пациентов с онкологическими заболеваниями, что может способствовать улучшению качества их жизни. Для подтверждения эффективности метода необходимы дополнительные исследования на большей выборке пациентов данной категории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан клинический случай успешного применения интервальной гипоксии-гипероксической терапии в составе комплексной терапии и реабилитации пациента, длительно зависимого от методов интенсивной терапии. Метод показал свою эффективность в улучшении состояния больного.

На текущий момент в медицинских базах данных отсутствуют публикации о применении ИГГТ у пациентов реанимационного профиля и в условиях отделений анестезиологии и реанимации, что подчёркивает уникальность и научную новизну подхода.

На базе Научно-исследовательского института реабилитологии им. проф. Пряникова И.В. ФНКЦ РР начато диссертационное исследование, посвящённое оценке эффективности ИГГТ в условиях реанимационных отделений. Ожидается, что результаты подтвердят преимущества метода в составе комплексной нейрореабилитации пациентов в хроническом критическом состоянии.

В долгосрочной перспективе данное исследование может заложить основу для внедрения ИГГТ в лечение других неврологических синдромов у пациентов реанимационного профиля, расширяя возможности терапии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Ильина, М.В. Петрова — анализ данных, написание статьи и научная редакция; А.В. Гречко — кураторство работы, редактирование, одобрение статьи для публикации; Д.В. Ильин — обработка

и интерпретация данных, написание статьи; Г.К. Спирина — обзор публикаций по теме статьи, написание 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.

Согласие на публикацию. Авторы получили письменное информированное добровольное согласие пациента на публикацию персональных данных, в том числе фотографий (с закрытием лица), в научном журнале, включая его электронную версию (дата подписания: 06.06.2025). Объём публикуемых данных с пациентом согласован.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

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 неприменима, новые данные не собирали и не создавали.

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

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. A.A. Ilna, M.V. Petrova — data analysis, writing and scientific revision of the manuscript text; A.V. Grechko — curating the work, reviewing and approving the manuscript; D.V. Ilin — data processing and interpretation, writing the manuscript; G.K. Spirina — review of publications on the topic of the article, writing of the manuscript text. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Consent for publication. The authors received written informed voluntary consent from the patient to publish personal data, including photographs (with the face covered), in a scientific journal, including its electronic version (date of signing: 06.06.2025). The volume of published data was agreed upon with the patient.

Funding sources. This study was not supported by any external sources of funding.

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

Statement of originality. In creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

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

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. The present paper was submitted to the journal on a proactive basis and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Girard K, Raffin TA. The chronically critically ill: To save or let die? *Respir Care*. 1985;30(5):339–347.
- Parfenov AL, Razzhivin VP, Petrova MV. Chronic critical illness: Current aspects of the problem (review). *Sovrem Tekhnologii Med*. 2022;14(3):70–81. doi: 10.17691/stm2022.14.3.08
- Carson SS, Bach PB. The epidemiology and costs of chronic critical illness. *Crit Care Clin*. 2002;18(3):461–476. doi: 10.1016/s0749-0704(02)00015-5
- Hawkins RB, Raymond SL, Stortz JA, et al. Chronic critical illness and the persistent inflammation, immunosuppression, and catabolism syndrome. *Front Immunol*. 2018;9:1511. doi: 10.3389/fimmu.2018.01511
- Madrid RA, McGee W. Value, chronic critical illness, and choosing wisely. *J Intensive Care Med*. 2019;34(8):609–614. doi: 10.1177/0885066618790942
- Glazachev OS, Lyamina NP, Spirina GK. Intermittent hypoxic conditioning: experience and potential in cardiac rehabilitation programs. *Russian journal of Cardiology*. 2021;26(5):156–162. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4426 EDN: NDKICG
- Navarrete-Opazo A, Mitchell GS. Therapeutic potential of intermittent hypoxia: A matter of dose. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2014;307(10):R1181–1197. doi: 10.1152/ajpregu.00208.2014
- Patent RUS № RU 2799252 C1/25.03.2022. *A method of increasing the level of consciousness of patients with chronic disorders of the level of consciousness.* (In Russ.) Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2799252C1/ru> EDN: ARGYAY
- Schega L, Peter B, Törpel A, et al. Effects of intermittent hypoxia on cognitive performance and quality of life in elderly adults: A pilot study. *Gerontology*. 2013;59(4):316–323. doi: 10.1159/000350927
- Serebrovska ZO, Xi L, Tumanovska LV, et al. Response of circulating inflammatory markers to intermittent hypoxia-hyperoxia training in healthy elderly people and patients with mild cognitive impairment. *Life (Basel)*. 2022;12(3):432. doi: 10.3390/life12030432
- Syrkin AL, Glazachev OS, Kopylov FY, et al. Adaptation to intermittent hypoxia-hyperoxia in the rehabilitation of patients with ischemic heart disease: Exercise tolerance and quality of life. *Kardiologiya*. 2017;57(5):10–16. doi: 10.18565/cardio.2017.5.10-16 EDN: YPQJWX

ОБ АВТОРАХ

* Ильина Анна Александровна;

адрес: Россия, 141534, Московская обл., Солнечногорский район, д. Лыткино, д. 777;
ORCID: 0000-0001-6188-870X;
eLibrary SPIN: 1200-3966;
e-mail: shishova-1992@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Anna A. Ilna;

address: 777 Lytkino village, Solnechnogorsky district, Moscow region, Russia, 141534;
ORCID: 0000-0001-6188-870X;
eLibrary SPIN: 1200-3966;
e-mail: shishova-1992@mail.ru

Петрова Марина Владимировна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0003-4272-0957;
eLibrary SPIN: 9132-4190;
e-mail: mpetrova@fnkcrr.ru

Гречко Андрей Вячеславович, д-р мед. наук, профессор,
академик РАН;
ORCID: 0000-0003-3318-796X;
eLibrary SPIN: 4865-8723;
e-mail: avgrechko@fnkcrr.ru

Ильин Дмитрий Владиленович;
ORCID: 0009-0007-0997-7773;
e-mail: lionglass45@gmail.com

Спирина Галина Константиновна;
ORCID: 0000-0002-9574-5931;
e-mail: g.spirina@aimediq.com

Marina V. Petrova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0003-4272-0957;
eLibrary SPIN: 9132-4190;
e-mail: mpetrova@fnkcrr.ru

Andrey V. Grechko, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor,
academician of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0003-3318-796X;
eLibrary SPIN: 4865-8723;
e-mail: avgrechko@fnkcrr.ru

Dmitri V. Ilin;
ORCID: 0009-0007-0997-7773;
e-mail: lionglass45@gmail.com

Galina K. Spirina;
ORCID: 0000-0002-9574-5931;
e-mail: g.spirina@aimediq.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author