

ВРАЧ

И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

№1 2025

MEDICAL DOCTOR AND IT



ISSN 1811-0193

9 771811 019000 >



№1 2025

MEDICAL DOCTOR AND IT

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 3.3.9. Медицинская информатика (биологические науки);
- 3.3.9. Медицинская информатика (медицинские науки).

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission on specialties:

- 2.3.1. System analysis, management and information processing (technical sciences);
- 2.3.5. Mathematical and software support of computer systems, complexes and computer networks (technical sciences);
- 3.3.9. Medical Informatics (biological sciences);
- 3.3.9. Medical Informatics (medical sciences).

Журнал индексируется в базе данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science.

The journal is included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database on the Web of Science platform.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Карпов О.Э., академик РАН, д.м.н., проф., генеральный директор ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия

ПОЧЕТНЫЙ ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Стародубов В.И., академик РАН, д.м.н., проф., научный руководитель ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, представитель России в Исполнительном Комитете ВОЗ, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Зарубина Т.В., член-корреспондент РАН, д.м.н., проф., заведующая кафедрой медицинской кибернетики и информатики, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия

Гусев А.В., к.т.н., член экспертного совета Минздрава по вопросам использования ИКТ, старший научный сотрудник ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, директор по развитию компании «К-Скай», Петрозаводск, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Андриков Д.А., к.т.н., доцент Инженерной Академии ФГАОУ ВО РУДН, директор компании «Иммерсмед», Москва, Россия

Владимирский А.В., д.м.н., заместитель директора по научной работе ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва, Россия

Грибова В.В., член-корреспондент РАН, д.т.н., заместитель директора по научной работе ФГБУ «Институт автоматизации и процессов управления» Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

Гулиев Я.И., к.т.н., директор Исследовательского центра медицинской информатики ИПС РАН им. А.К. Айламазяна, Ярославль, Россия

Зингерман Б.В., руководитель направления цифровой медицины ИНВИТРО, Москва, Россия

Карась С.И., д.м.н., специалист отдела координации научной и образовательной деятельности НИИ кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, Россия

Лебедев Г.С., д.т.н., директор института цифровой медицины, заведующий кафедрой информационных и интернет технологий ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России, Москва, Россия

Неусыпин К.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой системы автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Пролетарский А.В., д.т.н., профессор, декан факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Реброва О.Ю., д.м.н., профессор кафедры медицинской кибернетики и информатики, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия

Столбов А.П., д.т.н., профессор кафедры организации здравоохранения, медицинской статистики и информатики ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России, Москва, Россия

Храмов А.Е., д.ф.м.н., профессор, руководитель Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета им. И. Канта, Калининград, Россия

Шахгельдян К.И., д.т.н., директор Научно-образовательного центра «Искусственный интеллект» ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», Владивосток, Россия

Швырев С.Л., к.м.н. заместитель руководителя Регламентной службы федерального реестра НСИ ФГБУ ЦНИИОИЗ Минздрава России, Москва, Россия

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Писарчик А., к.б.н., проф., заведующий кафедрой вычислительной биологии, центр биомедицинских технологий, Мадридский технический университет, Мадрид, Испания

CHIEF EDITOR

Karpov O.E., Academician of the RAS, DSc, Prof., General Director of the Pirogov National Medical and Surgical Center, Moscow, Russia

HONORARY CHIEF EDITOR

Starodubov V.I., Academician of the RAS, DSc, Prof., Scientific Director of the FRIHOI of MoH of Russia, Representative of Russia in the WHO Executive Committee, Moscow, Russia

DEPUTY CHIEF EDITORS

Zarubina T.V., Corresponding Member of the RAS, DSc, Prof., Head of the Department of Medical Cybernetics and Informatics, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Gusev A.V., PhD, member of the expert council of the Ministry of Health on the use of ICT, Senior Researcher of the FRIHOI of MoH of Russia, development director of the K-Sky company, Petrozavodsk, Russia

EDITORIAL BOARD

Andrikov D.A., PhD, Associate Prof. of the Engineering Academy of the RUDN University, Director of Immersed, Moscow, Russia

Vladimirsky A.V., DSc, Deputy Director for Research, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies Department of Health of the City of Moscow, Moscow, Russia

Gribova V.V., Corresponding Member of the RAS, DSc, Deputy Director for Research of the Federal State Budgetary Institution "Institute of Automation and Control Processes" of the Far Eastern Institute of the RAS Branch, Vladivostok, Russia

Guliev Ya.I., PhD, Director of the Research Center for Medical Informatics of the Institute of Applied Problems of the Russian Academy of Sciences named after A.K. Ailamazyan, Yaroslavl, Russia

Zingerman B.V., Head of Digital Medicine, INVITRO, Moscow, Russia

Karas S.I., Dr. Sci. (Med), Specialist at the Department for Research and Training Coordination, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Centre of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Lebedev G.S. DSc, Director of The Digital Health Institute, Head of The Department of information and Internet technologies, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

Neusypin K.A., DSc, Prof., Head of the Automatic Control Systems Dept., Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Proletarsky A.V., DSc, Prof., Dean of the Informatics, and Control Systems Department, Bauman University, Moscow, Russia

Rebrova O.Yu., DSc, Prof. of the Department of Medical Cybernetics and Informatics, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Stolbov A.P., DSc, Prof. of the Department of Public Health Organization, Medical Statistics and Informatics of the Faculty of Professional Development of Doctors of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

Khramov A.E., DSc, Prof., Head of Baltic Center for Neurotechnology and Artificial Intelligence, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Shakhgeldyan K.I., DSc, Director of the Scientific and Educational Center «Artificial Intelligence» Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

Shvyrev S.L., PhD, Deputy Head of the Regulatory Service of the Federal Register of the FRIHOI of MoH of Russia, Moscow, Russia

FOREIGN MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Pisarchik A., PhD, Prof., Head of Department of Computational Biology, Center of Biomedical Technologies, Technical University of Madrid, Spain

Издается с 2004 года.

Включен в перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Читатели могут принять участие в обсуждении статей, опубликованных в журнале «Врач и информационные технологии», и направить актуальные вопросы в редакцию (vit-j@pirogov-center.ru).

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Товарный знак и название «Врач и информационные технологии» являются исключительной собственностью ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России.

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений, а также за то, что в материалах не содержится данных, не подлежащих открытой публикации.

Материалы рецензируются редакционной коллегией. Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Перепечатка текстов без разрешения журнала «Врач и информационные технологии» запрещена. При цитировании материалов ссылка на журнал обязательна.

За содержание рекламы ответственность несет рекламодатель.

Учредитель — ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России.
Издатель — ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России.

Адрес редакции:

105203, г. Москва,
ул. Нижняя Первомайская, д. 70,
e-mail: vit-j@pirogov-center.ru.
Тел. +7 (499) 464-03-03.

Главный редактор:

Карпов О.Э., академик РАН,
д.м.н., проф.

Почетный главный редактор:

Стародубов В.И.,
академик РАН, д.м.н., проф.

Зам. главного редактора:

Зарубина Т.В., член-корреспондент РАН,
д.м.н., проф.

Гусев А.В., к.т.н.

Компьютерная верстка и дизайн:

Издательство Пироговского Центра.

Подписные индексы:

Каталог агентства «Роспечать» — 82615.

Отпечатано в типографии ООО «Вива-Стар»
г. Москва, ул. Электрозаводская, д. 20
www.vivastar.ru

Подписано в печать 17 марта 2025 г.

Общий тираж 1000 экз.

Распространяется бесплатно.

© Издательство Пироговского Центра

ОБЗОРЫ

Кобякова О.С., Ерёмченко О.А., Канев А.А., Куракова Н.Г.

**КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ:
АНАЛИЗ КЕЙСОВ И ПЕРСПЕКТИВ 6**

Осадчая П.В., Гаранин А.А., Давыдкин И.Л.

**ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕМОНИТОРИНГА ПАЦИЕНТОВ
С ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ:
НАРРАТИВНЫЙ ОБЗОР 22**

Рябова М.А., Голубев Н.А., Поликарпов А.В.

**МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОДХОДЫ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ СТАТИСТИКИ 30**

Цыганков В.А., Кудрин Р.А., Катаев А.В.,

Шабалина О.А., Садовникова Н.П.

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СЕГМЕНТАЦИИ
И АНАЛИЗУ СТРУКТУР ГОЛОВНОГО МОЗГА:
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ 42**

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Васильев Ю.А., Памова А.П., Арзамасов К.М., Владзимирский А.В.,

Заянчковский С.Ю., Зинченко В.В.

**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТРИК ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
В ОБЛАСТИ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ 58**

Аюпова И.О., Колсанов А.В., Попов Н.В., Хамадеева А.М.,

Давидюк М.А., Кирюков С. Р., Аюпов О.Н.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ЦЕФАЛОМЕТРИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВ НА БОКОВЫХ
ТЕЛЕРЕНТГЕНОГРАММАХ 70**

Седашкина О.А., Колсанов А.В.

**НОМОГРАММА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХРОНИЧЕСКОЙ
БОЛЕЗНИ ПОЧЕК У ДЕТЕЙ, РАЗРАБОТАННАЯ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 82**

REVIEWS

- Kobyakova O.S., Eremchenko O.A., Kanev A.F., Kurakova N.G.*
**QUANTUM TECHNOLOGIES IN HEALTHCARE:
 ANALYSIS OF CASES AND PERSPECTIVES** 6
- Osadchaya P.V., Garanin A.A., Davydkin I.L.*
**FEASIBILITY OF TELEMONITORING
 IN HEMATOLOGY PATIENTS:
 A NARRATIVE REVIEW** 22
- Ryabova M.A., Golubev N.A., Polikarpov A.V.*
**INTERNATIONAL APPROACHES TO THE COLLECTION
 AND PROCESSING OF GOVERNMENT STATISTICS** 30
- Tsygankov V.A., Kudrin R.A., Kataev A.V.,
 Shabalina O.A., Sadovnikova N.P.*
**MODERN APPROACHES TO SEGMENTATION
 AND ANALYSIS OF BRAIN STRUCTURES:
 PROBLEMS AND SOLUTIONS** 44

ORIGINAL RESEARCH

- Vasilev Yu.A., Pamova A.P., Arzamasov K.M., Vladzimirskyy A.V.,
 Zayunchkovskiy S.Yu., Zinchenko V.V.*
**PRESENTATION OF DIAGNOSTIC ACCURACY
 METRICS BASED ON CLASSIFICATION
 OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SOFTWARE
 IN RADIOLOGY** 58
- Ayupova I.O., Kolsanov A.V., Popov N.V., Khamadeeva A.M.,
 Davidiuk M.A., Kiryukov S.R., Ayupov O.N.*
**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ACCURACY
 OF CEPHALOMETRIC LANDMARK IDENTIFICATION
 IN LATERAL TELEROENTGENOGRAMS** 70
- Sedashkina O.A., Kolsanov A.V.*
**NOMOGRAM FOR PREDICTING CHRONIC
 KIDNEY DISEASE IN CHILDREN DEVELOPED
 USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS** 82

MEDICAL DOCTOR AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Registration certificate
 PI No. FS77-80906 dated April 09, 2021

Published since 2004.

This journal is included in the list of the Higher Attestation Commission, detailing leading peer-reviewed scientific journals and publications recommended for publishing the foremost scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of sciences.

Readers may take part in the discussion of articles published in the journal «Medical Doctor and Information Technologies», and send topical questions to the editorial office (vit-j@pirogov-center.ru).

The journal is registered by the Ministry of the Russian Federation for Press, TV and Radio Broadcasting, and Mass Media. The trademark and name «Medical Doctor and Information Technologies» are the exclusive property of the Pirogov National Medical and Surgical Center.

The authors of the published materials are responsible for the selection and accuracy of the facts, quotes, statistical data and other information, as well as ensuring that the materials do not contain data that is not subject to open publication.

The materials are reviewed by the editorial board. Editorial opinion may not reflect the views of the author.

Reprinting of texts without the permission of the journal «Medical Doctor and Information Technologies» is prohibited. When citing materials, a reference to the journal is required.

The advertiser is responsible for the content of the advertisement.

Founder — Pirogov National Medical and Surgical Center.

Publisher — Pirogov National Medical and Surgical Center.

Editorial office address:

105203, Moscow, st. Nizhnaya Pervomayskaya, 70, e-mail: vit-j@pirogov-center.ru. +7(499) 464-03-03.

Chief Editor:

Karpov O.E., Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Prof.

Honorary chief editor:

Starodubov V.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Prof.

Deputy chief editors:

Zarubina T.V., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, prof.

Gusev A.V., Ph.D.

DTP and design:

Pirogov Center Publishing House.

Subscription indexes:

Catalogue of the agency «Rospechat» — 82615.

Printed in the «Viva-Star» Moscow, st. Elektrozavodskaya, 20 www.vivastar.ru

Signed for printing on March 17, 2025.

Circulation 1000 copies.

Free distribution.

© Pirogov Center Publishing House

КОБЯКОВА О.С.,

д.м.н., ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, г. Москва, Россия,
e-mail: kobyakovaos@mednet.ru

ЕРЁМЧЕНКО О.А.,

ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, г. Москва, Россия,
e-mail: tatricks@mail.ru

КАНЕВ А.А.,

ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, г. Москва, Россия,
e-mail: alexkanev92@gmail.com

КУРАКОВА Н.Г.,

д.б.н., ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, г. Москва, Россия,
e-mail: idmz@mednet.ru

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ: АНАЛИЗ КЕЙСОВ И ПЕРСПЕКТИВ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_6

Аннотация. Использование квантовых технологий открывает новые возможности для разработки лекарственных средств, улучшения качества диагностики, защиты медицинской информации и персональных данных, повышения эффективности принятия врачебных решений. Целью исследования являлось изучение перспектив развития и применения квантовых технологий в сфере здравоохранения. Для достижения цели выполнен анализ отдельных кластеров квантовых технологий, имеющих максимальные перспективы коммерческого применения в здравоохранении; построен патентный ландшафт рассматриваемой технологической области; подготовлен обзор созданных на основе квантовых технологий рыночных продуктов для здравоохранения. Показано, что максимальное развитие в сфере здравоохранения получили квантовые сенсоры, квантовые вычисления и квантово-устойчивые решения кибербезопасности. Количество созданных технических решений в рассматриваемой технологической области, получивших патентную охрану, составляет более 6,5 тысяч, из которых 3,5 тысячи поддерживаются.

В качестве ключевых бенефициаров использования квантовых технологий в здравоохранении предлагается рассматривать, прежде всего, фармацевтические компании и биотехнологические стартапы, которые могут сократить время моделирования и тестирования лекарств, повысить точность прогнозирования побочных эффектов лекарственных средств и взаимодействия лекарственных препаратов за счет использования квантовых вычислений, ускорить анализ больших данных и оптимизировать протоколы клинических исследований.

Ключевые слова: квантовые вычисления, биомедицина, квантовые сенсоры, искусственный интеллект, здравоохранение.

Для цитирования: Кобякова О.С., Ерёмченко О.А., Канев А.А., Куракова Н.Г. Квантовые вычисления в здравоохранении: анализ кейсов и перспектив. Врачи и информационные технологии. 2025; 1: 6-21. doi: 10.25881/18110193_2025_1_6.

KOBYAKOVA O.S.,

DSc, Russian Research Institute of Health, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: kobyakovaos@mednet.ru

EREMCHENKO O.A.,

Russian Research Institute of Health, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: tatrix@mail.ru

KANEV A.F.,

Russian Research Institute of Health, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: alexkanev92@gmail.com

KURAKOVA N.G.

DSc, Russian Research Institute of Health, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: idmz@mednet.ru

QUANTUM TECHNOLOGIES IN HEALTHCARE: ANALYSIS OF CASES AND PERSPECTIVES

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_6

Abstract. *The use of quantum technologies opens up new opportunities for the development of medicines, improving the quality of diagnostics, protection of medical information and personal data, increasing the efficiency of medical decision-making. The aim of the research was to study the prospects of development and application of quantum technologies in the field of healthcare. In order to achieve the goal, the analysis of separate clusters of quantum technologies with maximum prospects of commercial application in healthcare was performed; the patent landscape of the considered technological area was built; a review of market products for healthcare created on the basis of quantum technologies was prepared. It is shown that quantum sensors, quantum computing and quantum-resistant cybersecurity solutions have received maximum development in healthcare. The number of created technical solutions in the technological field under consideration, which received patent protection, is more than 6.5 thousand, of which 3.5 thousand are supported.*

As key beneficiaries of the use of quantum technologies in healthcare it is proposed to consider, first of all, pharmaceutical companies and biotechnology startups, which can reduce the time of modeling and testing of drugs, improve the accuracy of predicting side effects of drugs and drug-drug interactions through the use of quantum computing, accelerate the analysis of big data and optimize clinical trial protocols.

Keywords: *quantum computing, biomedicine, quantum sensors, artificial intelligence, healthcare.*

For citation: *Kobyakova O.S., Eremchenko O.A., Kanev A.A., Kurakova N.G. Quantum technologies in healthcare: analysis of cases and perspectives. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 6-21. doi: 10.25881/18110193_2025_1_6.*

ВВЕДЕНИЕ

Квантовые технологии, которые еще недавно являлись разделом теоретической физики, сегодня представляют собой новую перспективную научно-технологическую область, имеющую значительный потенциал практического применения в различных отраслях.

Эксперты дают разные оценки временного интервала, необходимого для создания квантового компьютера для массового применения в реальном секторе экономики (от 5 до 40 лет) [1], разнятся и прогнозы объема рынка, созданного продуктами и услугами на основе квантовых технологий. По расчетам Европейского индустриального консорциума по фотонике (EPIC), объем такого рынка вырастет примерно с 480 млн долл. в 2018 г. до 3,2 млрд долл. в 2030 г. [2]. Консалтинговая компания McKinsey прогнозирует глобальный рынок квантовых вычислений в пределах 45-131 млрд долл. к 2040 г. [3]. Согласно исследованию «Рексофт Консалтинг», объем рынка квантовых вычислений в России к 2040 г. может превысить 250 млрд руб. [4].

Активные инвестиции в развитие квантовых технологий начались в 2000-х гг., а запуск масштабных государственных программ пришелся на 2010-2020 гг. В 2013 г. началась реализация Национальной программы Китая по квантовым технологиям (Chinese National Quantum Initiative), в 2017 г. – Национальная программа Великобритании (UK National Quantum Technologies Programme) и проект Европейского союза Quantum Flagship, в 2018 г. стартовала National Quantum Initiative в США. Бюджет каждой из перечисленных долгосрочных программ и инициатив составляет более 1 млрд долл. Лидером по инвестициям государственного сектора в НИОКР является Китай, общий объем объявленных инвестиций квантовых технологий в 2020 г. составил 15,3 млрд долл. [5].

Одной из самых перспективных областей применения квантовых вычислений является медицина. В течение последних пяти лет российскими и зарубежными учеными опубликован ряд работ, описывающих ключевые направления в области биохимии и квантовой вычислительной биологии [6], примеры использования квантовых технологий для разработки датчиков и сенсоров [7], [8], для обработки и защиты персональных медицинских данных [9] и другие).

Технологии машинного обучения для формирования клинических решений требуют быстрой обработки колоссального объема данных, с чем эффективно справляются квантовые технологии, что может ускорить развитие персонализированной медицины [10]. Технологии квантовых вычислений позволяют получать более детальные и четкие МР- и КТ-изображения, а также интерпретировать их результаты с применением технологии искусственного интеллекта [11].

Несмотря на то, что большая часть квантовых технологий в медицине пока находится на стадии экспериментов, потенциал их внедрения в практическое применение уже ясно виден. Благодаря своим уникальным возможностям — от параллельных вычислений с помощью кубитов до сверхточных измерений — квантовые технологии открывают новые горизонты в диагностике, разработке лекарств и персонализированном лечении. Уже в 2023 г. рынок квантовых технологий в медицине оценивался в 85 млн долл., и по прогнозам достигнет отметки в 1,9 млрд долл. в 2032 г. [12].

В настоящее время в Российской Федерации не действуют нормативно-правовые документы, регламентирующие развитие квантовых технологий в здравоохранении. Вместе с тем, потребность наращивания научно-технологического потенциала в этой области зафиксирована в Федеральном проекте «Цифровые технологии» [13] и в Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года [14].

Выполненный в рамках настоящего исследования обзор российских научных публикаций обнаружил отсутствие детального анализа перспектив применения квантовых технологий в сфере здравоохранения. Большинство публикаций российских авторов, в фокусе которых находятся вопросы развития квантовых технологий, лишь подчеркивают применимость практических результатов в области медицины и здравоохранения ([15], [16] и другие), либо описывают перспективы внедрения без конкретизации технических решений, а также уточняют перечень организаций и компаний, занимающихся разработкой или имеющих на права на их коммерческое использование (см., например, [17]).

Целью настоящего исследования являлся анализ перспектив развития и применения квантовых технологий в сфере здравоохранения. В

рамках этой цели представляется целесообразным решение следующих задач:

- выполнение анализа глобальных трендов развития квантовых технологий в области медицины, включая выделение ключевых секторов, имеющих максимальные перспективы коммерческого применения разработанных технологий;
- построение патентных ландшафтов для технологической области «квантовые технологии в медицине»;
- обзор уже созданных на основе квантовых технологий рыночных продуктов для здравоохранения.

В качестве информационной базы были использованы открытые российские и зарубежные источники (научные публикации, отчеты компаний и агентств, нормативно-правовые документы), а также данные патентной базы Orbit Intelligence, аккумулирующей информацию о более чем 122 млн патентных публикаций из 120 патентных ведомств, включая Роспатент.

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ МЕДИЦИНЫ И КЛЮЧЕВЫЕ СЕКТОРА ИХ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Квантовые технологии, основанные на использовании принципов квантовой механики, открывают новые возможности для разработки лекарственных средств, улучшения качества диагностики, защиты медицинской информации и персональных данных, повышения стандартов качества оказания медицинской помощи и обоснованности принятия врачебных решений.

В аналитическом обзоре «Квантовые технологии для медицины. Новые подходы в вычислениях, защите данных и сенсорике – 2024» отмечается, что тремя ключевыми секторами применения квантовых технологий в здравоохранении являются квантовые вычисления, квантово-устойчивые решения кибербезопасности и квантовые сенсоры [18]. Анализ научных статей и обзоров позволил выделить расширенный перечень возможных направлений использования квантовых технологий в медицине. Рассмотрим их подробнее в рамках этих трех секторов.

Квантовые вычисления находятся на переднем крае вычислительных инноваций,

используя внутренние принципы квантовой механики для обработки информации способом, принципиально отличным от классических вычислительных парадигм. В основе квантовых вычислений лежат явления суперпозиции и запутанности, наделяющие их способностью выполнять сложные вычисления экспоненциально быстрее, чем их классические аналоги [19]. Квантовые вычисления находят широкое применение в решении сложных теоретических и практических задач здравоохранения:

- в разработке и создании новых материалов с уникальными свойствами, например, более точных и эффективных медицинских инструментов;
- в моделировании сложных систем, таких как биологические процессы в организме человека, с использованием мощностей квантовых компьютеров, что может быть использовано при разработке новых методов лечения и диагностики заболеваний;
- для оптимизации процессов управления здравоохранением, таких как планирование ресурсов, мониторинг логистических процессов;
- при создании новых методов лечения заболеваний, основанных на принципах квантовой физики;
- при разработке алгоритмов на основе квантовых вычислений, симулирующих взаимодействие молекул с высокой точностью [20] и позволяющих предсказывать их поведение, что делает отбор кандидатов на роль лекарственных средств быстрым и эффективным, ускоряя фармацевтические разработки;
- для ускорения процесса обработки массивных объемов генетической информации, полученных в ходе секвенирования ДНК.

Квантово-устойчивые решения кибербезопасности направлены на обеспечение сохранности конфиденциальной информации и включают:

- квантовую криптографию, которая позволяет обеспечить безопасную передачу данных, что особенно важно при обмене информацией о пациентах;
- квантовое распределение ключей, используемое для шифрования и аутентификации данных, при которых медицинские учреждения могут обмениваться ключами с использованием квантовой физики, что предотвращает их перехват;

- модели квантовой аутентификации, разработанные для защиты систем управления медицинскими устройствами.

Квантовые сенсоры и датчики используются для высокоточной диагностики и мониторинга физиологических параметров, повышая чувствительность диагностических инструментов для раннего выявления заболеваний. Благодаря способности таких устройств обнаруживать крайне слабые магнитные и электрические поля, квантовые сенсоры находят практическое применение в таких медицинских технологиях, как:

- магнитоэнцефалография, где квантовые сенсоры для мониторинга магнитных полей мозга позволяют диагностировать эпилепсию и другие неврологические расстройства;
- магнитокардиография, в которой квантовые сенсоры используются при диагностике аритмий и ишемических заболеваний;
- мониторинг кислорода и биомолекул для максимально быстрого выявления изменений в жизненно важных показателях работы организма пациента.

В качестве ключевых бенефициаров использования квантовых технологий в здравоохранении следует рассматривать, прежде всего, фармацевтические компании и биотехнологические стартапы, которые могут сократить время моделирования и тестирования лекарств, повысить точность прогнозирования побочных эффектов лекарственных средств и взаимодействий лекарственных препаратов за счет использования квантовых вычислений, ускорить анализ больших данных и оптимизировать протоколы клинических исследований.

Примером успешной коммерциализации квантовых технологий фармкомпаниями является совместная разработка компаний Pfizer и IBM, завершившаяся созданием программы IBM Quantum, в которой квантовые вычисления используются для молекулярного моделирования и прогнозирования взаимодействий лекарств [21]. Результатом сотрудничества компании Biogen, специализирующейся на лечении заболеваний центральной нервной системы, с компанией Accenture Labs стало применение квантовых алгоритмов для анализа и моделирования белков, связанных с болезнью Альцгеймера и другими нейродегенеративными заболеваниями [22].

Для медицинских организаций и диагностических центров использование квантовых

сенсоров и датчиков открывает перспективы повышения качества диагностических процедур и мониторинга пациентов, ускорения секвенирования ДНК и анализа генетических мутаций. Технологии квантового шифрования позволят оказывать телемедицинские услуги без риска утраты персонализированных медицинских данных. Дополнительными областями коммерческого применения квантовых технологий в этом секторе являются разработка новых методов лечения и улучшение алгоритмов анализа медицинских изображений, таких как МРТ, КТ и рентген, что позволяет быстрее выявлять патологии.

Медицинские и клиничко-диагностические центры уже сегодня активно изучают перспективы внедрения квантовых технологий в свою работу. Так, Госпиталь университета Тохоку совместно с Университетом Тохоку, Национальным институтом информационных и коммуникационных технологий Японии и компанией Toshiba разработали первую в мире систему для оказания персонализированных медицинских услуг, которая хранит данные геномов многих пациентов. Представленная в 2022 г. система применяет квантовое распределение ключей, обеспечивает доступ на основе персональной аутентификации и индивидуального согласия на использование данных, предотвращает утечку и потерю данных. Проект был поддержан Советом по науке, технологиям и инновациям Японии (CSTI) и частично реализован в рамках национальной программы «Фотоника и квантовые технологии для общества 5.0» [23].

Оценив высокий коммерческий потенциал применения квантовых технологий в здравоохранении целый ряд транснациональных компаний, таких как IBM, Siemens Healthineers, Google Health, Intuitive Surgical, Roche и др., инициировал проведение НИОКР в этой области. Одновременно ведущие университеты мира включились в коммерциализацию разработанных инновационных решений через механизмы лицензирования патентов, создание университетских стартапов или выполнения совместных с промышленными партнерами НИОКР, например, Microsoft и Case Western Reserve University сотрудничают для использования квантовых технологий в моделировании биомолекулярных процессов, включая изучение сворачивания белков и изучение взаимодействия молекул с

клеточными мембранами. Также в рамках этого сотрудничества и использования подхода Magnetic Resonance Fingerprinting удалось улучшить точность результатов МРТ на 30% и сократить время сканирования до трех раз по сравнению с традиционными методами [24].

Медицинские ассоциации, национальные институты здравоохранения, организации по охране здоровья и пр. рассматривают квантовые технологии как инструмент повышения эффективности управления медицинскими ресурсами и обеспечения безопасной обработки данных. Примером применения квантовых технологий для управления национальной системой здравоохранения может служить внедрение квантовой криптографии для защиты передачи медицинских данных между организациями здравоохранения и исследовательскими центрами Национальной службой здравоохранения Великобритании [25]. По оценкам оператора проекта по внедрению квантовых технологий в сектор здравоохранения, только планирование операционной деятельности и распределение пациентов неотложной помощи с повышением эффективности процесса всего на 1% потенциально способно обеспечить экономию около 1,5 млрд фунтов стерлингов в год [25].

M. Shams с соавторами [26] представили ретроспективный обзор влияния квантовых

технологий на здравоохранение, который манифестирует необходимость развития междисциплинарного сотрудничества и объединении опыта и знаний в квантовой физике, медицине и науке о данных для достижения прорывных результатов в этой области. Разработка надежных и масштабируемых квантовых технологий, подходящих для медицинских учреждений, по мнению авторов обзора, должна стать приоритетом исследователей в области квантового здравоохранения.

АНАЛИЗ ПАТЕНТНЫХ ЛАНДШАФТОВ В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

Для анализа патентной активности в области разработки квантовых технологий для здравоохранения был выполнен поиск в патентной базе Orbit Intelligence. По состоянию на 01.11.2024 г., по ключевому слову «квантовый» с ограничением по коду МПК А61 «Медицина и ветеринария; гигиена» (поисковый образ ((Quantum)/TI/AB/OBJ/ADB/ICLM AND (A61#)/IPC)) найдено 6980 патентных семейств, из которых действующие составляли чуть более половины – 3721. Распределение действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к медицине, ветеринарии и гигиене, по первому году публикации представлено на рисунке 1.

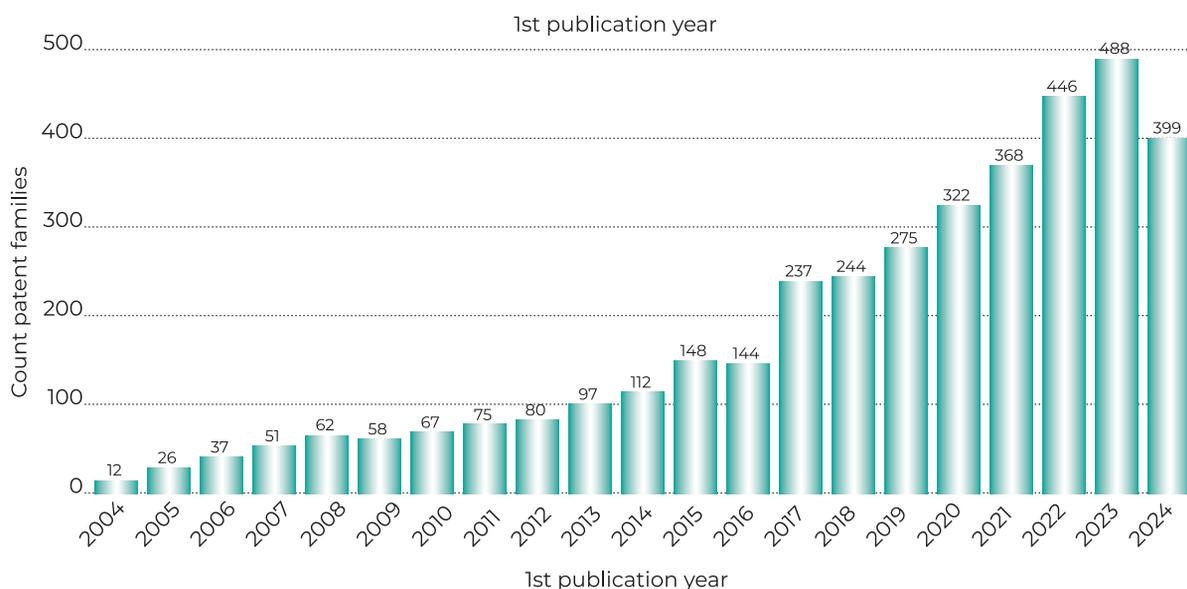


Рисунок 1 — Распределение действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена» по первому году публикации. Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

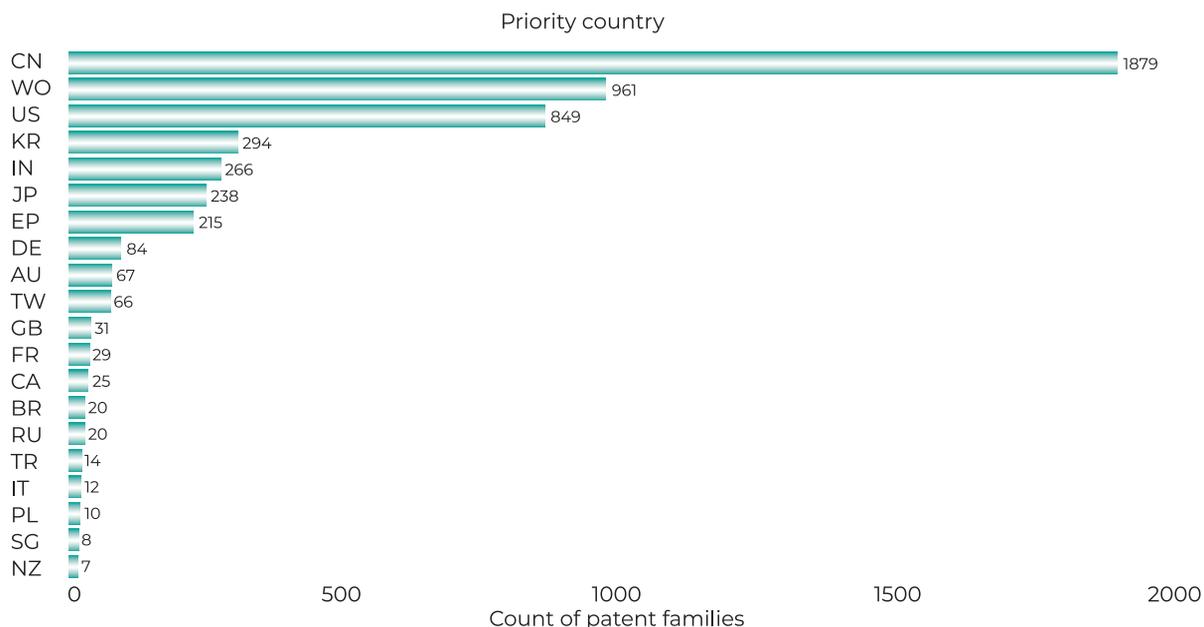


Рисунок 2 — Топ-20 стран приоритета действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена». Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

Странами-лидерами по числу действующих патентных семейств в области квантовых технологий в анализируемой области (в распределении по стране приоритета) являются Китай, США, Южная Корея, Индия, Япония (Рисунок 2). В исследуемой выборке 20 патентных семейств имеют российский приоритет, что соответствует доли в 1,2% от общемирового объема патентных семейств.

В число топ-20 патентообладателей действующих патентных семейств вошли как крупнейшие транснациональные корпорации (такие, как Siemens, Philips, Canon, Fujifilm, General Electric), так и университеты (например, Beijing University of Chinese Medicine, Wuhan University, Johns Hopkins University). В таблице 1 представлены топ-20 патентообладателей действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена». При этом патентные семейства, принадлежащие университетам, выходят за пределы национальной юрисдикции, т.е. опубликованы более чем в одной стране (Рисунок 3).

Анализ концепций действующих патентных семейств в анализируемой области показал, что максимальные усилия изобретателей сосредоточены на таких областях, как технологии визуализации, использование источников света, использование квантовых технологий для изучения живых систем, диагностики и лечения, облучение и рентгеновские лучи (Рисунок 4).

Данные Orbit Intelligence о числе внешних ссылок на действующие патентные семейства в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена», свидетельствуют о высоком значении некоторых из зарегистрированных изобретений для развития этой области техники. Так, наиболее цитируемые патентные семейства получили от 150 до 800 внешних цитат. В качестве примера приведем топ-5 патентных семейств, получивших максимальный уровень цитирования (более 400 внешних ссылок).

1. JP2014133893 – Наночастицы на основе флуоресцентного кремнезема (англ. – Fluorescent silica-based nanoparticle), 720 внешних ссылок. Патент описывает технологию создания

Таблица 1 — Топ-20 патентообладателей действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена». Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

	Патентообладатель	Число патентных семейств
1	SIEMENS HEALTHINEERS	43
2	BEIJING UNIVERSITY OF CHINESE MEDICINE	25
3	SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY - CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	23
4	PHILIPS	21
5	CANON	18
6	BEIHANG UNIVERSITY OF AERONAUTICS & ASTRONAUTICS	17
7	WUHAN UNIVERSITY	17
8	FUDAN UNIVERSITY	15
9	JOHNS HOPKINS UNIVERSITY	15
10	LPU - LOVELY PROFESSIONAL UNIVERSITY	15
11	NANJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	15
12	SICHUAN UNIVERSITY	15
13	SOOCHOW UNIVERSITY	15
14	SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	15
15	CNRS - CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE	14
16	FUZHOU UNIVERSITY	14
17	SEOUL NATIONAL UNIVERSITY R&DB FOUNDATION	14
18	FUJIFILM	13
19	GENERAL ELECTRIC	13
20	SHENZHEN UNIVERSITY	13

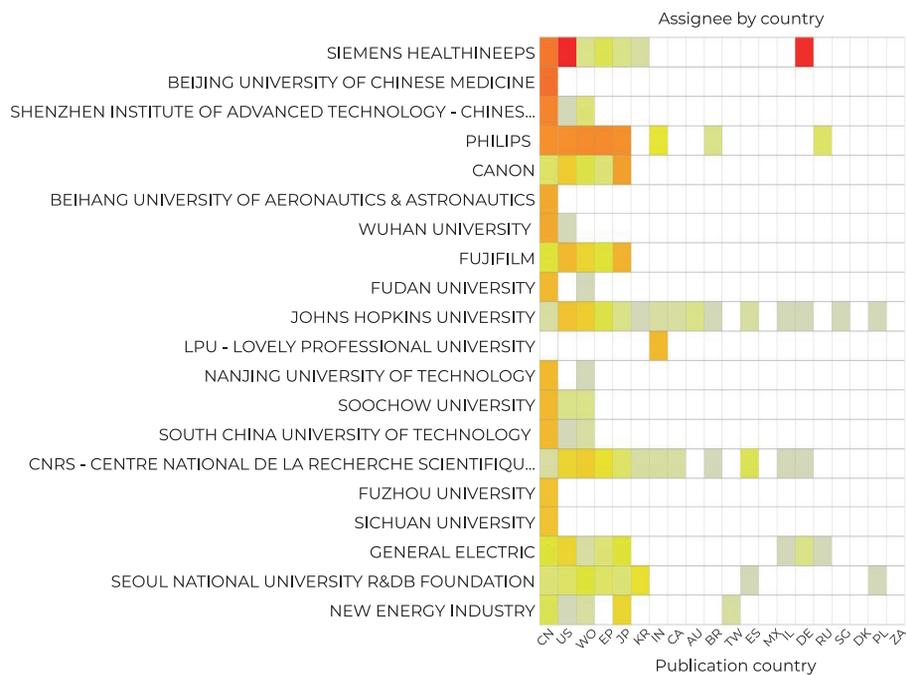


Рисунок 3 — Страны публикации топ-20 патентообладателей действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена». Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

шифрования и меток времени. Эти подходы помогают минимизировать погрешности, защищать данные и обеспечивать их целостность, что делает систему более надежной и точной. Изобретение выполняет проверку целостности датчиков в системе мониторинга уровня глюкозы.

5. JP2024074937 – Метод и набор для клеточной иммунотерапии (англ. – Method and compositions for cellular immunotherapy), 411 внешних ссылок. Патент описывает методы клеточной иммунотерапии, направленной на борьбу с онкологическими и другими заболеваниями путем активации иммунной системы пациента. Квантовые технологии в данном патенте могут использоваться для улучшения точности диагностики при помощи квантовых датчиков, мониторинга иммунного ответа и разработки индивидуализированных терапевтических подходов с использованием квантовых вычислений и квантовых биомаркеров. Изобретение может быть использовано для обеспечения и/или усиления иммунных ответов, опосредованных клеточной иммунотерапией.

К числу действующих патентных семейств в области квантовых технологий, отнесенных к коду МПК «Медицина и ветеринария; гигиена» с приоритетом России, относятся следующие:

- RU2811935 «Лечение резистентного бактериального кератита с помощью мягкой контактной линзы на квантовых точках», патентообладатель – Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза»;
- RU2794820 «Способ мониторинга выдыхаемого пациентом воздуха для прогноза декомпенсации сахарного диабета», патентообладатель – Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- RU2743993 «Комплекс для детекции и направленного разрушения клеток», патентообладатель – МИСиС;
- RU196226 «Носитель для диагностики, направленной доставки и контролируемого высвобождения лекарственных средств», патентообладатель – НИЯУ МИФИ;
- RU2629390 «Фотосенсибилизатор на основе полупроводниковых квантовых точек и хлорина еб», патентообладатель – ИТМО;
- RU2695130 «Способ получения коллоидных

квантовых точек селенида кадмия в оболочке хитозана», патентообладатель – Алтайский государственный университет.

Большая часть из 19 действующих патентных семейств в анализируемой области с приоритетом России принадлежит российским вузам, пять патентных семейств – физическим лицам и лишь два – коммерческим компаниям.

ИСТОРИЯ УСПЕХОВ СОЗДАНИЯ РЫНОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Как уже было отмечено, компании промышленного сектора инвестируют в развитие квантовых технологий значительные средства, что позволило им в короткие сроки не только создать принципиально новые технические решения, но и превратить их в коммерческие продукты на внутренних и внешних рынках. В качестве историй успехов создания рыночных продуктов для здравоохранения на основе квантовых технологий можно отметить следующие.

- Квантовые компьютеры и программное обеспечение для моделирования сложных систем, таких как биологические процессы в организме человека от **IBM Quantum** (подразделения американской компании IBM). Компания обеспечивает пользователям удаленный доступ к квантовым компьютерам через платформу IBM Cloud, предоставляет обучающие материалы для использования квантовых вычислений в различных областях, например, моделирования молекулярного поведения и химических реакций. Для работы с квантовыми компьютерами IBM предоставляет инструменты разработки, такие как Qiskit (уже имеющий более 600 тысяч пользователей и используемый 700 университетами по всему миру) [27].
- Облачные услуги для разработки и запуска квантовых алгоритмов от **Microsoft Azure Quantum** – подразделения компании Microsoft. Azure Quantum включает в себя набор инструментов для разработки, тестирования и оптимизации квантовых алгоритмов Azure Quantum Development Kit (QDK) и сервиса Azure Quantum Service, предоставляющего доступ к реальным квантовым системам [28].
- **Google Cloud Quantum AI** – инструмент для создания и запуска квантовых алгоритмов

на облачной платформе от Google. Сервис включает в себя три составляющих: среду выполнения для квантовых алгоритмов Qiskit Runtime for Google Cloud, оптимизированные библиотеки машинного обучения для разработки и запуска квантовых моделей машинного обучения, средства для обработки и анализа данных, которые могут быть использованы в квантовых алгоритмах [29].

- Квантовые процессоры, которые могут быть использованы для оптимизации процессов в здравоохранении от американской компании **IonQ**. Квантовые компьютеры IonQ обеспечивают высокую точность и стабильность работы квантовых систем, и могут решать сложные задачи, недоступные для классических компьютеров. Раскрытые характеристики квантовой системы IonQ Aria 5-го поколения были самыми производительными в мире среди коммерчески доступных технических решений (по состоянию на январь 2024 г.). Скорость расчетов и технические преимущества IonQ Aria основались на использовании 21 производительного кубита со средней точностью 99,95–99,61% [30].
- Квантовые сенсоры и датчики для повышения точности и чувствительности диагностических инструментов от **Honeywell Quantum Solutions** (дочерняя компания американской Honeywell) [31].

Honeywell Quantum Solutions выпускает ряд продуктов, которые могут быть использованы в различных областях медицины:

- квантовые гироскопы для навигации и ориентации в пространстве, могут найти применение в медицинских устройствах, таких как роботы-хирурги или экзоскелеты;

- квантовые акселерометры для измерения ускорения, могут использоваться для мониторинга состояния пациента, например, при травмах или во время реабилитации;
- квантовые магнитометры для измерения магнитного поля, могут применяться для диагностики заболеваний, связанных с изменением магнитного поля организма, таких как эпилепсия или болезнь Альцгеймера [31].

Обращает на себя внимание отсутствие у IBM, Microsoft, Google, IonQ и Honeywell объемного портфеля патентных семейств, отнесенных к медицине, ветеринарии и гигиене, ни одна из перечисленных компаний не имеет более пяти действующих патентных семейств по классу МПК А61.

Анализ действующих патентных семейств всех пяти компаний показал, что для изобретений, основанных на использовании квантовых технологий, не указываются коды МПК из раздела А «Удовлетворение жизненных потребностей человека» (Таблица 2).

Рисунок 5 отображает распределение патентных семейств компании IBM в области квантовых технологий по технологическим областям. На рисунке в соответствии с кодами МПК, присвоенными изобретению в патентной заявке патентообладателем, отмечены: красным цветом – наиболее часто встречающиеся технологические области, оранжевым и желтым – менее часто встречающиеся технологические области. Как свидетельствуют данные Orbit Intelligence, наиболее часто квантовые технологии относятся к таким областям, как компьютерные технологии; электрооборудование, аппаратура и энергетика; полупроводники.

Таблица 2 — Число действующих патентных семейств, основанных на использовании квантовых технологий, компаний IBM, Microsoft, Google, IonQ и Honeywell. Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

Компания	Число действующих патентных семейств	
	всего	отнесенных к области медицины
IBM	746	3
Microsoft	300	5
Google	210	0
IonQ	110	0
Honeywell	47	0

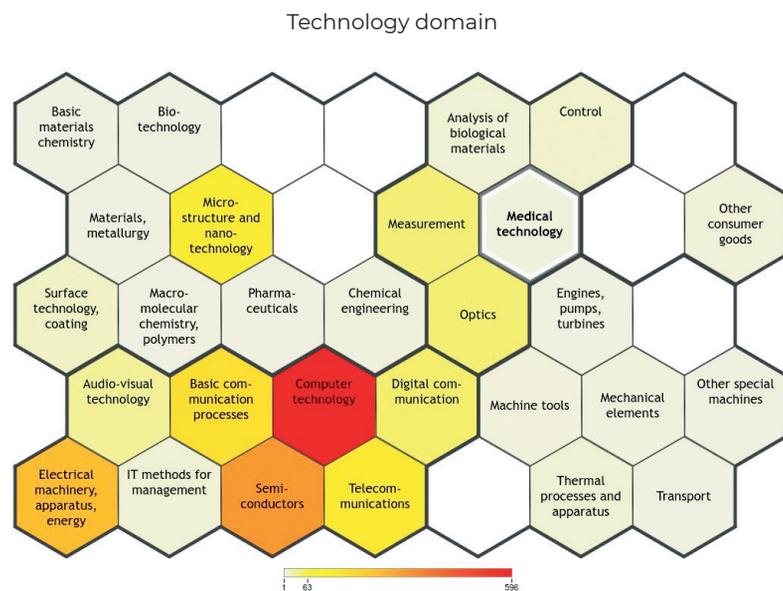


Рисунок 5 — Распределение действующих патентных семейств компании IBM в области квантовых технологий по технологическим областям.

Данные Orbit Intelligence на 01.11.2024 г.

Таким образом, следует отметить, что несмотря на признание широких возможностей использования квантовых технологий в области медицины, ведущие компании-поставщики коммерческих решений не создают узкоспециализированные продукты и технологии только для медицинских целей.

В числе основных глобальных технологических лидеров в области квантовых вычислений наряду с перечисленными транснациональными корпорациями можно также отметить Intel, D-Wave Systems, Rigetti, Alibaba Group, Nvidia и Baidu. Кроме того, значимый вклад в развитие отрасли вносят стартапы Q-CTRL, Pasqal, QC Ware, Zapata Computing, 1QBit, ColdQuanta, Atom Computing и PsiQuantum.

Компания IBM наряду с развитием квантовых вычислений, которые могут быть использованы в различных сферах, реализует точечные проекты в области медицины. Так, в 2021 г. IBM совместно с клиникой Кливленда (Cleveland Clinic) открыла Discovery Accelerator – исследовательский центр для НИОКР в области биологии и здравоохранения с использованием технологий искусственного интеллекта и высокопроизводительных квантовых вычислений [32]. В 2023 г.

IBM начала реализацию совместного с компанией Moderna проекта, направленного на разработку оптимального материала для липидной оболочки, позволяющей доставить мРНК в целевую клетку [33].

Некоторые примеры использования квантовых технологий в области здравоохранения приводятся в аналитическом отчете 2024 г., подготовленном коллективом автором под руководством А.К. Федорова [18]. Например, разработка стартапом Strand Therapeutics платформы для создания программируемых мРНК-терапевтических препаратов длительного действия; реализация проекта OpenQKD по использованию технологий квантовых коммуникаций для защиты цифровых медицинских снимков и генетических данных учеными Медицинского университета Граца (Австрия) и компании FragmentiX, и другие.

В числе российских компаний, вовлеченных в разработку технических решений на основе квантовых технологий для медицины, можно отметить научно-производственную компанию QRate, в портфеле проектов которой создание квантовых сенсоров и датчиков, повышающих точность и чувствительность диагностических

инструментов. Значительные ресурсы в разработку квантового компьютера, который может быть использован для моделирования сложных систем, таких как биологические процессы в организме человека, вкладывает ГК «Росатом». В числе других российских компаний можно отметить стартапы Куборд, QApp, и QLU. Так, например, Куборд совместно с Российским квантовым центром и компанией Genotek разработала методику сборки генома с использованием квантовых алгоритмов, что существенно облегчило изучение новых видов и структурных изменений ДНК [18].

В целом, несмотря на то, что в Российской Федерации функционирует целый ряд центров по развитию квантовых технологий (Российский квантовый центр, Казанский квантовый центр, Центр квантовых технологий при МГУ, Центр компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» при МИСИС), бюджет каждого из которых оценивается примерно в 6 млн евро в год, применению квантовых технологий в здравоохранении в этих центрах уделяется достаточно скромное внимание, ограничивающееся преимущественно разработкой квантовых сенсоров, которые в т.ч. могут быть использованы в сфере биомедицины [34]. Кроме того, развитие квантовых технологий также ограничено введением санкций со стороны США и Евросоюза [35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квантовые технологии на сегодняшний день оформились в глобальный тренд научно-технологического развития, предлагая использовать новые подходы к решению сложных задач в разных отраслях.

Как показывают прогнозы ведущих аналитических агентств и научного сообщества, внедрение квантовых технологий в национальные системы здравоохранения способно привести к значительным трансформациям: от ускоренной разработки лекарственных препаратов и персонализированного планирования лечения до обеспечения беспрецедентно высокого уровня безопасности передачи данных в рамках оказания телемедицинских услуг. В первую очередь это будет касаться более эффективно использования таких технологий, как искусственный интеллект и машинное обучение. Наряду с широкими перспективами применения

квантовых технологий в отрасли здравоохранения, их развитие и внедрение в практическую деятельность сопряжено с рядом проблем и барьеров, в числе которых следует отметить следующие:

- Технические ограничения, связанные с отсутствием стабильно работающих квантовых компьютеров и устройств с необходимым набором характеристик. Во-первых, для поддержания состояния запутанности и суперпозиции и проведения квантовых расчетов должны быть созданы условия сохранения свойств кубитов, а именно – сверхнизкие температуры, что усложняет использование квантовых компьютеров в медицинских учреждениях. Во-вторых, недостаточная стабильность кубитов и их подверженность влиянию тепла и шума приводит к невозможности проведения сложных вычислений, требующих значительного времени и точности. Современные квантовые устройства пока не достигли уровня устойчивости и масштабируемости, необходимого для их повсеместного использования в медицине, а высокий уровень ошибок и трудности в создании стабильных квантовых кубитов ограничивают их применение в клинической практике.
- Высокая стоимость квантовых исследований и оборудования, а также затраты на клинические исследования, подтверждающие эффективность квантовых технологий в реальных медицинских применениях. Квантовые вычисления, по крайней мере первое время, будут применяться точно для решения специфических задач [18].
- Дефицит достаточного числа высококвалифицированных кадров и мультидисциплинарных коллективов, владеющих знаниями в области физики, математики, информатики и медицины (как на этапе НИОКР, так и на этапе использования готовых технологий).
- Сложности интеграции с существующими медицинскими системами, использующими иные принципы работы и обработки данных.
- Отсутствие стандартизации и регулирования применения квантовых технологий в медицинской практике.

Для Российской Федерации актуальны все вышеперечисленные детерминанты развития квантовых технологий в медицине и в

здравоохранении. Их перечень дополняется и некоторыми специфическими ограничениями: низкой активностью частного сектора и венчурных фондов в финансировании НИОКР; меньшим числом лабораторий и ресурсов по

сравнению со странами-лидерами данного направления; отсутствием развитой базы для производства собственных высокотехнологичных квантовых компонентов и зависимость от импортного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Скорочкин А. Квантовая готовность: ждет ли бизнес новая технологическая революция // Форбс. 28.10.2024. Доступно по: <https://www.forbes.ru/mneniya/523766-kvantovaa-gotovnost-zdet-li-biznes-novaa-tehnologiceskaa-revolucia>. Ссылка активна на 01.11.2024. [Skorochkin A. Kvantovaja gotovnost': zhdet li biznes novaja tehnologicheskaja revoljucija. Forbs. 2024 Oct 28. Available at: <https://www.forbes.ru/mneniya/523766-kvantovaa-gotovnost-zdet-li-biznes-novaa-tehnologiceskaa-revolucia>. Accessed Oct 28, 2024. (In Russ.)]
2. Global Quantum Technology [Internet]. EPIC; 2024. Available at: https://epic-photonics.com/market_reports/quantum-technology/#:~:text=The%20total%20market%20value%20for,to%20%24650M%20in%202030.
3. Quantum Technology Monitor [Internet]. McKinsey; 2024. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20progress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf>. Accessed Nov 11, 2024.
4. Исследование «Рексофт Консалтинг»: объем рынка квантовых вычислений в России к 2040 году может превысить 250 млрд рублей [интернет]. Рексофт Консалтинг, 26.08.2024. Доступно по: <https://www.reksoft.ru/blog/2024/08/26/reksoft-consulting-quantum-computing-research>. Ссылка активна на 01.11.2024. [Issledovanie «Reksoft Konsalting»: ob'em rynka kvantovyh vychislenij v Rossii k 2040 godu mozhet prevysit' 250 mlrd rublej [internet]. Reksoft Konsalting, 26.08.2024. Available at: <https://www.reksoft.ru/blog/2024/08/26/reksoft-consulting-quantum-computing-research>. Accessed Nov 1, 2024. (In Russ.)]
5. Mushtaque A. 16 Most Advanced Countries in Quantum Computing [Internet]. Yahoo Finance; 2023 Dec 6. Available at: <https://finance.yahoo.com/news/16-most-advanced-countries-quantum-131132253.html>. Accessed Nov 11, 2024.
6. Fedorov AK, Gelfand M. Towards practical applications in quantum computational biology. *Nature Computational Science*. 2021; 1: 114-119. doi: 10.1038/s43588-021-00024-z/
7. Watts DP, Bordes J, Brown JR, et al. Photon quantum entanglement in the MeV regime and its application in PET imaging. *Nature Communications*. 2021; 12: 2646. doi: 10.1038/s41467-021-22907-5.
8. Ruzycka-Ayoush M, Kowalik P, Kowalczyk A, et al. Quantum dots as targeted doxorubicin drug delivery nanosystems in human lung cancer cells. *Cancer Nanotechnology*. 2021; 12: 8. doi: 10.1186/s12645-021-00080-0.
9. Harishankar R, Muppidi S, Osborne M, et al. Security in the quantum computing era. *IBM Institute for Business Value*. 2023 Jan 25. Available at: <https://www.ibm.com/downloads/cas/EZEGKEB5>. Accessed Nov 11, 2024.
10. Solenov D, Brieler J, Scherrer JF. The Potential of Quantum Computing and Machine Learning to Advance Clinical Research and Change the Practice of Medicine. *Mo Med*. 2018; 115(5): 463-467.
11. Dilsizian SE, Siegel EL. Artificial intelligence in medicine and cardiac imaging: harnessing big data and advanced computing to provide personalized medical diagnosis and treatment. *Curr Cardiol Rep*. 2014; 16(1): 441. doi: 10.1007/s11886-013-0441-8.
12. Quantum computing in healthcare market [Internet]. Market US; 2023. Available at: <https://market.us/report/quantum-computing-in-healthcare-market/#:~:text=Global%20Quantum%20Computing%20in%20Healthcare%20Market%20size%20is%20expected%20to,period%20from%202023%20to%202033>. Accessed Nov 11, 2024.
13. Цифровые технологии [интернет]. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Доступно по: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/878>. Ссылка активна на 01.11.2024. [Cifrovye tekhnologii [internet]. Ministerstvo cifrovogo

- razvitiya, svyazi i massovyh kommunikacij Rossijskoj Federacii. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/878>. Accessed Nov 1, 2024. (In Russ.)]
14. Национальная стратегия [интернет]. ИИ РФ. Доступно по: <https://ai.gov.ru/national-strategy>. Ссылка активна на 01.11.2024. [Nacional'naya strategiya [internet]. II RF. Available at: <https://ai.gov.ru/national-strategy>. Accessed Nov 1, 2024. (In Russ.)]
 15. Гурбанмырадова Л., Имамова Г., Гылыджов М., Мяхремгулыев Йе. Будущее квантовых вычислений: революционные изменения в различных отраслях // Всемирный ученый. – 2024. – Т.1. – Вып. 25. [Gurbanmyradova L, Imamova G, Gylydzhov M, Mjahremgulyjev Ye. Budushhee kvantovyh vychislenij: revoljucionnye izmenenija v razlichnyh otrasljah. Vsemirnyj uchenyj. 2024; 1(25). (In Russ.)]
 16. Кабарухин А.П., Камалиденов К.Ш., Култазин Н.М., Ангапов В.Д. Перспективы использования квантовых компьютеров // Наука и образование сегодня. – 2022. – С.31-37. [Kabaruhin AP, Kamalidenov KSh, Kultazin NM, Angapov VD. Perspektivy ispol'zovanija kvantovyh komp'juterov. Nauka i obrazovanie segodnja. 2022: 31-37. (In Russ.)]
 17. Раткин Л.С. Квантовые коммуникации и квантовые технологии для мониторинга качества медицинского обслуживания и моделирования процессов в сфере демографии // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2022. – С.981-982. [Ratkin LS. Kvantovye kommunikacii i kvantovye tehnologii dlja monitoringa kachestva medicinskogo obsluzhivaniya i modelirovaniya processov v sfere demografii. Rossija: tendencii i perspektivy razvitija. 2022: 981-982. (In Russ.)]
 18. Квантовые технологии для медицины. Новые подходы в вычислениях, защите данных и сенсорике [интернет]. РКЦ; 2024. Доступно по: https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/51b/qoj849o65fbxhslly3l9l5xvaz3wd1ha/FBT_12_02_2024_V2.pdf?170774935322904136. Ссылка активна на 01.11.2024. [Kvantovye tekhnologii dlya mediciny. Novye podhody v vychisleniyah, zashchite dannyh i sensorike [internet]. RKC; 2024. Available at: https://cdnweb.roscongress.org/upload/medialibrary/51b/qoj849o65fbxhslly3l9l5xvaz3wd1ha/FBT_12_02_2024_V2.pdf?170774935322904136. Accessed Nov 1, 2024. (In Russ.)]
 19. Nielsen MA, Chuang IL. Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
 20. Peruzzo A, McClean J, Shadbolt P, et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. Nature Communications. 2014; 5: 4213. doi: 10.1038/ncomms5213.
 21. Optimizing clinical trial site performance: A focus on three AI capabilities [Internet]. IBM. 2023 Aug 7. Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/clinical-trial-optimization-ai>. Accessed Nov 11, 2024.
 22. Pioneering quantum computing in R&D [Internet]. Accenture. Available at: <https://www.accenture.com/us-en/case-studies/life-sciences/quantum-computing-advanced-drug-discovery>. Accessed Nov 11, 2024.

23. Toshiba, ToMMo, Tohoku University Hospital, and NICT Link Quantum Security and Personal Authentication, Successfully Deliver Secure Personalized Healthcare Use Case [Internet]. NICT, 2022 Dec 28. Available at: <https://www.nict.go.jp/en/press/2022/12/28-1.html>. Accessed Nov 11, 2024.
24. Collaboration with Microsoft on our innovative MRI approach yields major gains, offering promise of earlier disease diagnosis [Internet]. Case Western Reserve University. Available at: <https://case.edu/mrf>. Accessed Nov 11, 2024.
25. Investigating the application of near-term quantum computing techniques to addressing operational healthcare use cases important to NHS health and care provision [Internet]. National Quantum Computing Center. Available at: <https://www.nqcc.ac.uk/investigating-the-application-of-near-term-quantum-computing-techniques-to-addressing-operational-healthcare-use-cases-important-to-nhs-health-and-care-provision>. Accessed Nov 11, 2024.
26. Shams M, Choudhari J, Reyes K, et al. The Quantum-Medical Nexus: Understanding the Impact of Quantum Technologies on Healthcare. *Cureus*. 2023; 15(10): e48077. doi: 10.7759/cureus.48077.
27. Qiskit: The software for quantum performance [Internet]. IBM. Available at: <https://www.ibm.com/quantum/blog/quantum-software-vision>. Accessed Nov 11, 2024.
28. Release notes for the Quantum Development Kit (QDK) and Azure Quantum [Internet]. Microsoft, 2024 Sep 13. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/release-notes>. Accessed Nov 11, 2024.
29. Explore Quantum AI [Internet]. Google. Available at: <https://quantumai.google>. Accessed Nov 11, 2024.
30. IonQ Aria: Practical Performance [Internet]. IonQ, 2024 Jan 18. Available at: <https://ionq.com/resources/ionq-aria-practical-performance>. Accessed Nov 11, 2024.
31. Honeywell Quantum Solutions [Internet]. Honeywell. Available at: <https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum>. Accessed Nov 11, 2024.
32. Cleveland Clinic and IBM Unveil Landmark 10-Year Partnership to Accelerate Discovery in Healthcare and Life Sciences [Internet]. IBM, 2021 Mar 30. Available at: <https://newsroom.ibm.com/2021-03-30-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-Landmark-10-Year-Partnership-to-Accelerate-Discovery-in-Healthcare-and-Life-Sciences>. Accessed Nov 11, 2024.
33. Moderna and IBM to Explore Quantum Computing and Generative AI for mRNA Science [Internet]. IBM, 2023 Apr 20. Available at: <https://newsroom.ibm.com/2023-04-20-Moderna-and-IBM-to-Explore-Quantum-Computing-and-Generative-AI-for-mRNA-Science>. Accessed Nov 11, 2024.
34. Fedorov AK, Akimov AV, Biamonte JD, et al. Quantum technologies in Russia. *Quantum Science and Technology*. 2019; 4(4). doi: 10.1088/2058-9565/ab4472.
35. Park J, Shin B. Conceptualizing digital sanctions as a new type of economic sanctions in the digital era: Digital-related sanctions measures against Russia and their consequences. *Journal of Eurasian Studies*. 2023. doi: 10.1177/18793665231217303.

ОСАДЧАЯ П.В.,

ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, г. Самара, Россия,
e-mail: p.v.osadchaya@samsmu.ru

ГАРАНИН А.А.,

к.м.н., ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, г. Самара, Россия,
e-mail: sameagle@yandex.ru

ДАВЫДКИН И.Л.,

д.м.н., профессор, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, г. Самара, Россия,
e-mail: i.l.davydkin@samsmu.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕМОНИТОРИНГА ПАЦИЕНТОВ С ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ: НАРРАТИВНЫЙ ОБЗОР

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_22

Аннотация. *Аналізу подвергнуты данные литературы, представленные в открытых медицинских источниках, об использовании возможностей телемедицины в гематологии. Телемедицинская поддержка представляет собой эффективный способ ведения и мониторинга пациентов с целью минимизации визитов в лечебные учреждения в тех случаях, когда этого можно избежать. Изучены опыт и перспективы данного вида взаимодействия с точки зрения удовлетворенности пациентов и эффективности мониторинга различных гематологических заболеваний. Несмотря на малое количество результатов с высокой доказательностью, проведенные исследования демонстрируют оптимистичную картину использования телемедицины в реальной клинической практике, что ведет к необходимости более масштабных и качественных исследований для внедрения различных форм телемониторинга в рутинное наблюдение за гематологическими пациентами.*

Ключевые слова: *телемониторинг, телемедицина, удаленное наблюдение, мобильное приложение, портативное устройство, гематология.*

Для цитирования: *Осадчая П.В., Гаранин А.А., Давыдкин И.Л. Возможности телемониторинга пациентов с гематологическими заболеваниями: нарративный обзор. Врач и информационные технологии. 2025; 1: 22-29. doi: 10.25881/18110193_2025_1_22.*

OSADCHAYA P.V.,

Federal State Budgetary Educational Institution Samara State Medical University of the Russian Ministry of Health, Samara, Russia, e-mail: p.v.osadchaya@samsmu.ru

GARANIN A.A.,

PhD, Federal State Budgetary Educational Institution Samara State Medical University of the Russian Ministry of Health, Samara, Russia, e-mail: sameagle@yandex.ru

DAVYDKIN I.L.,

DSc, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution Samara State Medical University of the Russian Ministry of Health, Samara, Russia, e-mail: i.l.davydkin@samsmu.ru

FEASIBILITY OF TELEMONITORING IN HEMATOLOGY PATIENTS: A NARRATIVE REVIEW

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_22

Abstract. Literature data presented in open medical sources on the use of telemedicine in hematology were analyzed. Telemedicine is an effective way to manage and monitor patients in order to minimize in-person hospital visits when this can be avoided. The experience and perspectives of this type of interaction in terms of patient satisfaction and effectiveness in monitoring various hematologic diseases have been studied. Despite the small number of results with high evidence, the studies demonstrate an optimistic picture of the use of telemedicine in real clinical practice, which leads to the need for more large-scale and high-quality studies to introduce various forms of telemonitoring in the routine follow-up of hematologic patients.

Keywords: telemedicine, eHealth, Digital Health, remote patient monitoring, mobile health devices, wearable device system, hematology, malignant, nonmalignant, patient perspective.

For citation: Osadchaya P.V., Garanin A.A., Davydkin I.L. Feasibility of telemonitoring in hematology patients: a narrative review. Medical doctor and information technology. 2025; 1:22-29. doi: 10.25881/18110193_2025_1_22.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие информационных технологий, затрагивающее различные сферы человеческой деятельности, не могло оставить в стороне один из важнейших на сегодняшний день аспектов медицины – взаимодействие врачей друг с другом и с пациентами. События последних нескольких лет и возросшая нагрузка на систему здравоохранения во всем мире в условиях COVID-19 дали стимул к распространению и популяризации телемедицины, позволяющей контролировать тактику ведения больных в формате «врач-врач», а также наладить удаленные консультации между врачом и пациентом, позволяющие оперативно решать диагностические и терапевтические вопросы без необходимости очного посещения [1].

Актуальность телемониторинга пациентов заключается не только в удобстве формата и экономии времени, но и в сохраняющемся дефиците медицинских специалистов, который остро наблюдается в малонаселенных и отдаленных от региональных центров местностях. Пациенты вынуждены ждать очной консультации в течение длительного времени, добираться до медицинских организаций, располагающих специалистами нужного профиля, из отдаленных населенных пунктов, что делает невыполнимыми своевременное оказание медицинской помощи и тщательный контроль эффективности и переносимости лечения.

Подобные ситуации особенно чреваты жизнеугрожающими последствиями, когда дело касается гематологических пациентов. Отсутствие возможности своевременно сообщить лечащему врачу о нежелательных реакциях или плохой переносимости лечения в совокупности с недостаточным объемом знаний о своем заболевании приводят к тому, что пациенты либо останавливают лечение, снижая приверженность и эффективность терапии, либо продолжают его в том же объеме, что приводит к развитию нежелательных явлений и осложнений, которые могут привести к серьезному ухудшению состояния здоровья [2]. В этой связи широкая доступность телемониторинга является основополагающим фактором успеха лечения, поддержания высокого качества жизни и увеличения выживаемости пациентов.

Отечественный опыт применения телемедицинских технологий при ведении пациентов гематологического профиля демонстрирует неуклонный рост телемедицинских консультаций в формате «врач-врач» и «врач-пациент» [3], что указывает на их высокую востребованность и перспективность. При этом направление «Детская онкология и гематология» оказалось одним из наиболее востребованных профилей для реализации телемедицинских консультаций между профильными НМИЦ и консультируемыми специализированными медицинскими организациями [4]. Схожие тенденции показывает опыт применения телемедицины нашими коллегами в области детской онкогематологии [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящий литературный обзор посвящен изучению актуальной научной медицинской информации в отношении использования телемониторинга у пациентов гематологического профиля с целью демонстрации перспективности и эффективности данного метода в рамках ведения пациентов. Поиск литературы по теме обзора осуществлен в базах данных Кокрановской библиотеки (<https://www.cochranelibrary.com>), Medline (https://www.nlm.nih.gov/medline/medline_overview.html), PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>), научной электронной библиотеке eLIBRARY (<https://elibrary.ru>), научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (<https://cyberleninka.ru>).

Критерии включения данных в список анализируемой литературы: исследования, опубликованные на русском и английском языках, давностью не более 10 лет (2014–2024). Формат публикации исследования: клинические оригинальные и экспериментальные исследования, систематические обзоры, метаанализы.

Критерии исключения: неполные исходные данные или исследования, в которых не отражена связь между использованием телемониторинга и гематологическими заболеваниями; язык публикации, отличный от русского или английского языков.

Ключевыми словами на русском языке в строке поиска информации баз данных являлись: телемониторинг, телемедицина, удаленное наблюдение, мобильное приложение, портативное устройство, гематология, гемобластозы, качество

жизни. Ключевыми словами на английском языке послужили: telemedicine, eHealth, digital health, remote patient monitoring, mobile health devices, wearable device system, hematology, malignant, nonmalignant, patient perspective.

При отборе по описанным выше отдельным и комбинированным ключевым словам из баз данных получено в общей сложности 1170 публикаций первичного поиска. На старте формирования литературного обзора проанализировано 26 литературных источников по заявленным ключевым словам, соответствующим цели настоящего описательного обзора. В результате селекции научно-медицинской информации, согласно представленным критериям, было отобрано 13 литературных источников, которые были включены в текст настоящей статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно п. 22 части 1 ст. 2 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», телемедицина представляет собой информационные технологии, которые обеспечивают дистанционное взаимодействие медицинских работников между собой и с пациентами, а также идентификацию указанных лиц и документирование действий при проведении консультаций, консилиумов и дистанционного медицинского наблюдения [6]. Телемедицинские консультации могут проводиться как в режиме реального времени, так и в отложенном виде, позволяя врачу ознакомиться с данными пациента позднее. В настоящее время спектр возможностей телемедицины позволяет проводить виртуальные консультации, дистанционный мониторинг пациентов, общение с врачом в чате и обучение пациентов на специальных платформах. Всё это требует не только соответствующего технического оснащения, но и соответствующего уровня цифрового образования как у врача, так и у пациента, их цифровой грамотности. Кроме того, важно соблюдение существующего законодательства, регламентирующего медицинскую деятельность с применением телемедицинских технологий с целью исключения нарушения врачебной тайны и утечки персональных данных пациентов третьим лицам. Данная проблема становится краеугольным камнем в вопросе проведения масштабных клинических

исследований в рамках телемониторинга по всему миру.

Тем не менее, использование телемедицины предоставляет определенные преимущества. Для пациентов – это возможность расширить доступ к качественной специализированной помощи, при этом сокращая затраты и время. Для врачей – это облегчение сотрудничества между специалистами и улучшение наблюдения за пациентами. Неоспоримое влияние в рамках экономики здравоохранения при снижении количества и длительности госпитализаций делает телемедицинские технологии приоритетным направлением развития медицины. Гематологические пациенты отличаются тем, что клинические проявления заболеваний крови характеризуются значительным разнообразием и затрагивают большое количество органов и систем. В этой связи декомпенсация заболевания может манифестировать широким спектром симптомов, которые пациент или участковый терапевт/врач общей практики может не распознать вовремя или недостаточно точно интерпретировать. В этой связи амбулаторный телепатронаж или аппаратный телемониторинг могут стать теми инструментами, которые помогут обеспечить доступность медицинской помощи пациентам гематологического профиля.

Систематический обзор [7], осуществленный в 2022 г. и характеризующий динамику развития телемедицины в гематологии с 1998 по 2018 гг., продемонстрировал целесообразность данной технологии для пациентов с заболеваниями крови. Исследователями было отобрано 32 статьи, среди которых лишь 4 исследования имеют среднее качество по шкале GRADE, остальные же признаны исследованиями очень низкого качества. В большинстве исследований использовались веб-приложения с применением онлайн-платформ, позволяющим пациентам отправлять свои данные и контролировать состояние. Видеосвязь применялась с целью осуществления медицинских консультаций. Телефонная связь использовалась для консультаций и горячих линий. В конечном итоге результат литературного обзора описывает позитивные и нейтральные эффекты телемедицины в сравнении с очными консультациями.

Jacobsen M. с соавт. исследовали возможность дистанционного мониторинга

онкогематологических пациентов с высоким риском осложнений с помощью портативных устройств, регистрирующих витальные функции и физическую активность [8]. В протокол было включено 79 пациентов стационара ($n = 54$) и поликлиники ($n = 25$), получающих стандартное лечение по соответствующим заболеваниям протоколам. Пациентам следовало самостоятельно заряжать устройства и использовать их постоянно с целью непрерывной записи параметров. В результате зарегистрирована высокая приверженность пациентов к использованию устройств, а полученные и обработанные данные свидетельствуют не только о возможности их мониторинга, но и высоком качестве.

Nawas M. с соавт. провели пилотное исследование телемониторинга пациентов после трансплантации гемопоэтических стволовых клеток [9]. Было осуществлено по 27 телемедицинских консультаций с каждым пациентом ($n = 25$) с использованием системы «Mobile Telehealth Cart», включающей в себя видеосвязь, цифровой стетоскоп и диагностическую камеру. В процессе консультации врачи по стандартному сценарию проводили идентификацию пациента, собирали промежуточный анамнез, оценивали витальные функции и физикальный статус, включающий в себя оценку кожных покровов, слизистой оболочки, сердечно-сосудистой системы и наличие отеков нижних конечностей. В конце каждой консультации пациент и врач заполняли опросник удовлетворенности телемедицинским визитом. В результате 81% пациентов остались удовлетворены телемедицинскими консультациями, тогда как врачи выразили недовольство из-за технических барьеров, приводивших к задержкам во время визитов, и не столь оптимального физикального обследования. Необходимо учитывать, что сами консультации проводились в период с 2011 по 2013 гг. и ограничивались технологиями того времени. Предположительно, более совершенные технологии потоковой передачи данных и видеоконференций минимизируют технологические неудобства для врачей.

Chang E. с соавт. использовали телемониторинг кардиотоксичности у пациентов, перенесших трансплантацию стволовых клеток в средне- и долгосрочной перспективе [10]. 18 пациентов старше 21 года, сохраняющие ремиссию через 1 год после трансплантации и имеющие

средний или высокий 10-летний риск развития сердечно-сосудистых заболеваний, находились под телемедицинским наблюдением в течение 4 недель, получив не менее 3 консультаций в неделю. Каждый пациент использовал устройства для удаленного мониторинга (mTelehealth Remote Patient Monitoring Kit), включающие в себя тонометр, весы, пульсоксиметр, глюкометр (при наличии сахарного диабета) и фитнес-трекер для оценки количества шагов. Все данные передавались через Bluetooth. Пациенты получили подробный инструктаж о необходимости рутинного мониторинга показателей и по работе с устройствами. В общей сложности исследователи зарегистрировали 27% тревожных случаев, потребовавших медицинского вмешательства.

Turner J. с соавт. создали систему домашнего мониторинга спирометрии для раннего выявления облитерирующего бронхиолита у пациентов с хронической реакцией «трансплантат против хозяина» [11]. 46 пациентов в течение года еженедельно проводили спирометрию в домашних условиях с помощью беспроводного спирометра, который собирал данные на облачном портале для мониторинга. При снижении ОФВ1 более 10%, данные с облачного портала отправлялись лечащему врачу пациента. Каждые 3 месяца пациентам проводилось лабораторное исследование легочной функции. К концу исследования измерения продолжали 36 пациентов (8 пациентов выбыли, 2 пациента скончались). Корреляция ОФВ1 между портативным спирометром и лабораторным исследованием составила $r = 0,974$ (95% доверительный интервал от 0,962 до 0,982; $p < 0,0001$) со средним отклонением 0,123 л (нижний предел – 0,294 л; верхний предел – 0,541 л) – среднее значение лабораторных измерений ОФВ1 было на 0,123 л выше по сравнению со средним показателем портативных измерений. Данные показатели находятся в пределах приемлемости воспроизводимости спирометрии, рекомендованной Американским торакальным обществом. В результате за время исследования у 11 пациентов был диагностирован облитерирующий бронхиолит.

Пандемия COVID-19 вызвала значительную трансформацию здравоохранения и привела к росту телемедицинских гематологических

консультаций [12]. Palandri F. с соавт. внедрили телемедицинскую систему, основанную на личных консультациях и телефонных звонках пациентам с миелопролиферативными заболеваниями и иммунной тромбоцитопенией [13]. Число консультаций составило 489, из которых 365 проводилось по телефону. Пациенты получили опросник, позволивший оценить их удовлетворенность качеством телемедицины, и в среднем она оценивалась на хорошем уровне.

Darcourt J. с соавт. протестировали возможности телемедицинских консультаций в формате видеосвязи с участием гематологических и онкологических пациентов [14]. Данный формат был предложен 1762 пациентам, из которых 84% дали свое согласие на участие. Из них 93% пациентов остались довольны консультацией. Из врачей, в свою очередь, было удовлетворено только 65%. Такой результат был обусловлен опасениями по поводу неадекватного взаимодействия с пациентами и страха упустить важные клинические данные.

Kumar P. с соавт. продемонстрировали результаты внедрения телемедицинских консультаций с помощью телефонной связи в случаях, когда пациент не мог лично посетить отделение гематологии [15]. Всего было принято 1187 запросов на консультацию, из которых 944 были успешно проведены. Только 53 пациента заполнили форму обратной связи о степени удовлетворенности консультацией, из которых 21,6% были не удовлетворены визитом.

Mussetti A. с соавт. провели пилотное исследование телемониторинга пациентов, выписанных после трансплантации гемопоэтических стволовых клеток [16]. Пациентам было необходимо ежедневно регистрировать данные пульсоксиметра, тонометра и общего самочувствия в специально разработанном приложении. Мониторинг продолжался до 2 недель после выписки. Из 21 пациента только 12 смогли завершить исследование. Основными причинами такого результата стали технические сбои и низкая цифровая грамотность пациентов.

Lupo-Stanghellini M. с соавт. использовали возможности телемедицины для долгосрочного наблюдения за пациентами, перенесшими трансплантацию, во время пандемии [17]. Пациентам без признаков респираторной дисфункции

через 3 месяца была проведена телемедицинская консультация. В случае выраженности симптомов или признаков, соответствующих осложнениям после трансплантации, пациенты посещались лично. Всего было проконсультировано 236 пациентов, у значительной части которых были выявлены хронические осложнения после трансплантации.

Paludo J. с соавт. внедрили систему удаленного мониторинга пациентов, получивших CAR-T-клеточную терапию, в амбулаторных условиях [18]. 123 пациента наблюдались до 30 дней после клеточной терапии, из которых 104 пациента были госпитализированы хотя бы 1 раз в период проведения исследования. Синдром выброса цитокинов был отмечен у 92 пациентов в среднем на 3 сутки после инфузии CAR-T-клеток, нейротоксичность выявилась у 45 пациентов в среднем на 7 сутки после инфузии. Большая часть пациентов отметила, что наличие удаленного мониторинга позволило им чувствовать себя более комфортно, находясь дома в период после инфузии.

Представленные в данном литературном обзоре исследования демонстрируют, что телемедицина является многообещающим методом оказания помощи пациентам, обеспечивающим удобство и экономию финансов и времени. Пандемия COVID-19 привела к внедрению телемедицины в рутинную работу медицинских специалистов, но существует определенная часть населения, которой данная опция остается недоступной вследствие как ограниченного доступа к технологиям и трудностей в их использовании, так и общего недоверия к подобному формату оказания помощи. Телемедицинские консультации не являются заменой существующим моделям оказания медицинской помощи, но должны использоваться в качестве дополнения для повышения эффективности специализированной помощи, снижения затрат на здравоохранение и широкого охвата населения, проживающего в отдаленных местностях, которое испытывает трудности с доступом в региональные гематологические центры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международный и отечественный опыт демонстрирует все возрастающий интерес и актуальность телемедицины. Гематология – тот

раздел медицины, где телемедицинские технологии могут быть особенно востребованы. Требуется критический анализ существующих моделей и законодательства, регламентирующих оказание медицинской помощи, осуществляемой посредством информационно-коммуникационных технологий, для активизации и реализации пациент-ориентированной медицины у пациентов гематологического профиля. С учетом уже проведенных исследований и тщательной проработки выявленных проблем телемедицинская

поддержка при гематологических заболеваниях поможет достичь желаемых результатов мониторинга и лечения пациентов на разных этапах развития болезни.

Следует приветствовать и поддерживать проекты, направленные на внедрение телепатронажа и телемониторинга состояния здоровья пациентов с гематологическими заболеваниями на амбулаторном этапе, для обеспечения высокого качества и доступности медицинской помощи.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Mussetti A, Peric Z, Figueroa C. COVID19 in hematological patients and telemedicine: lessons learned across Europe and the US. *Current Opinion in Infectious Diseases*. 2022; 35(4): 295-01. doi: 10.1097/qco.0000000000000843.
2. Шешунова Р.А. Формирование и развитие гематологической службы в России. Наука и инновации в медицине. – 2019. – Т. 4. – №1. – С.42-47. [Sheshunova RA. Establishing and development of hematology service in Russia. *Science and Innovations in Medicine*. 2019; 4(1): 42-47. (In Russ.)] doi: 10.35693/2500-1388-2019-4-1-42-47.
3. Лукина К.А., Зайцев Д.А., Гармаева Т.Ц., Менделеева Л.П. Телемедицина как инструмент межрегионального дистанционного взаимодействия с профильными медицинскими организациями субъектов Российской Федерации: 5-летний опыт ФГБУ «НМИЦ гематологии» Минздрава России // *Врач и информационные технологии*. – 2020. – №4. – С.68-77. [Lukina KA, Zaitsev DA, Garmayeva TC, Mendeleeva LP. Telemedicine as an instrument of interregional remote interaction with specialized medical organizations of the subjects of the Russian Federation: 5-year experience of the Federal State Budgetary Institution "NMIC of Hematology" of the Ministry of Health of the Russian Federation. *Doctor and information technology*. 2020; 4: 68-77. (In Russ.)] doi: 10.37690/1811-0193-2020-4-68-77.
4. Лагутин М.Д., Самофалов Д.А., Тюфилин Д.С., Чигрина В.П., Кильник А.И., Кобякова О.С. Тренды в оказании телемедицинских услуг ведущими федеральными центрами Российской Федерации. Социальные аспекты здоровья населения [сетевое издание]. – 2024. – Т.70. – №2. – С.1. Режим доступа: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/1581/27/lang,ru/>. [Lagutin MD, Samofalov DA, Tyufilin DS, Chigrina VP, Kilimnik AI, Kobyakova OS. In the trend of providing telemedicine services by federal centers of the Russian Federation. *Social aspects of public health [online edition]*. 2024; 70(2): 1. Achievement mode: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/1581/27/lang,ru/>. (In Russ.)] doi: 10.21045/2071-5021-2024-70-2-1.
5. Иванова А.А., Завалева Е.В., Павлюк А.В., Новичкова Г.А. Возможности, проблемы и перспективы применения телемедицинских технологий в области детской онкогематологии // *Вопросы гематологии/онкологии и иммунопатологии в педиатрии*. – 2020. – Т.19. – №3. – С.189-193. [Ivanova AA, Zavaleva EV, Pavlyuk AV, Novichkova GA. Possibilities, problems and prospects of application of telemedicine technologies in the field of pediatric hematology. *Issues of hematology/oncology and immunopathology in pediatrics*. 2020; 19(3): 189-193. (In Russ.)] doi: 10.24287/1726-1708-2020-19-3-189-193.

6. Федеральный закон от 21 ноября 2011 года №323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации». Доступно по: <https://minzdrav.gov.ru/documents/7025-federalnyy-zakon-ot-21-noyabrya-2011-g-323-fz-ob-osnovah-ohrany-zdorovya-grazhdan-v-rossiyskoy-federatsii> [Federal'nyi zakon № 323-FZ ot 21 noyabrya 2011 goda «Ob osnovah ohrany zdorov'ya grazhdan v Rossijskoj Federacii». Available from: <https://minzdrav.gov.ru/documents/7025-federalnyy-zakon-ot-21-noyabrya-2011-g-323-fz-ob-osnovah-ohrany-zdorovya-grazhdan-v-rossiyskoy-federatsii> (In Russ.)]
7. Shah AC, O'Dwyer LC, Badawy SM. Telemedicine in Malignant and Nonmalignant Hematology: Systematic Review of Pediatric and Adult Studies. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2021; 9(7): e29619. doi: 10.2196/29619.
8. Jacobsen M, Rottmann P, Dembek TA et al. Feasibility of Wearable-Based Remote Monitoring in Patients During Intensive Treatment for Aggressive Hematologic Malignancies. *JCO Clinical Cancer Informatics*. 2022; 6. doi: 10.1200/CCI.21.00126.
9. Nawas MT, Landau HJ, Sauter CS et al. Pilot Study of Telehealth Evaluations in Patients Undergoing Hematopoietic Cell Transplantation. *Biology of Blood and Marrow Transplantation*. 2020; 26(6): e135-7. doi: 10.1016/j.bbmt.2020.02.004.
10. Chang E, Iukuridze A, Echevarria M, et al. Feasibility and Acceptability of Using a Telehealth Platform to Monitor Cardiovascular Risk Factors in Hematopoietic Cell Transplantation Survivors at Risk for Cardiovascular Disease. *Biology of Blood and Marrow Transplantation*. 2020; 26(6): 1233-7. doi: 10.1016/j.bbmt.2020.02.027.
11. Turner J, He Q, Baker K, et al. Home Spirometry Telemonitoring for Early Detection of Bronchiolitis Obliterans Syndrome in Patients with Chronic Graft-versus-Host Disease. *Transplantation and Cellular Therapy*. 2021; 27(7): 616.e1-616.e6. doi: 10.1016/j.jtct.2021.03.024.
12. Postorino M, Treglia M, Giammatteo J, et al. Telemedicine as a Medical Examination Tool During the Covid-19 Emergency: The Experience of the Onco-Haematology Center of Tor Vergata Hospital in Rome. *Int J Environ Res Public Health*. 2020; 17(23): 8834. doi: 10.3390/ijerph17238834.
13. Palandri F, Bartoletti D, Giaquinta S, et al. Telemedicine in patients with haematological diseases during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic: selection criteria and patients' satisfaction. *British Journal of Haematology*. 2020; 192(2). doi: 10.1111/bjh.17208.
14. Darcourt JG, Aparicio K, Dorsey PM et al. Analysis of the Implementation of Telehealth Visits for Care of Patients With Cancer in Houston During the COVID-19 Pandemic. *JCO Oncology Practice*. 2021; 17(1): e36-43. doi: 10.1200/op.20.00572.
15. Kumar P, Aggarwal M, Dhawan R, et al. Tele-Medicine Services in Hematological Practice During Covid Pandemic: Its Feasibility and Difficulties. *Indian Journal of Hematology and Blood Transfusion*. 2020; 37(4): 528-33. doi: 10.1007/s12288-020-01385-7.
16. Mussetti A, Salas MQ, Condom M, et al. Use of Telehealth for Domiciliary Follow-up After Hematopoietic Cell Transplantation During the COVID-19 Pandemic: Prospective Pilot Study. *JMIR Formative Research*. 2021; 5(3): e26121. doi: 10.2196/26121.
17. Lupo-Stanghellini MT, Messina C, Markt S, et al. Following-up allogeneic transplantation recipients during the COVID-19 pandemic. *The Lancet Haematology*. 2020; 7(8): e564-5. doi: 10.1016/s2352-3026(20)30176-9.
18. Paludo J, Bansal R, Holland AT, et al. Pilot Implementation of Remote Patient Monitoring Program for Outpatient Management of CAR-T Cell Therapy. *Blood*. 2021; 138(S1): 568-568. doi: 10.1182/blood-2021-149103.

РЯБОВА М.А.,

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения». Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Россия, e-mail: riabova.marina.2004@mail.ru

ГОЛУБЕВ Н.А.,

к.м.н., ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Россия, e-mail: golubev@mednet.ru.

ПОЛИКАРПОВ А.В.,

к.м.н., ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Москва, Россия, e-mail: polikarpov@mednet.ru

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОДХОДЫ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СТАТИСТИКИ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_30

Аннотация. *Актуальность. Необходимость эффективного управления здравоохранением требует совершенствования медицинской статистики. Текущие методы сбора данных ограничены и неточны. Стратегия цифровой трансформации до 2030 года нацелена на создание безопасной и надежной информационной инфраструктуры здравоохранения с использованием отечественных технологий.*

Цель исследования: провести анализ существующих методов сбора и анализа медицинской статистики в различных странах.

Материалы и методы. Для получения информации выполнен поиск релевантных исследований, опубликованных в электронных базах eLibrary, Refseek, Virtual Learning Resources Center, Yandex и Google. Стратегию поиска составляли такие ключевые слова и словосочетания на русском и английском языках, как «статистика», «сбор», «анализ».

Результаты. Исследование выявило ключевые методы развития сбора медицинской статистики в России и мире, фокусируясь на точности и полноте данных. Анализировались принципы конфиденциальности, охвата, качества, вычислимости, регулярности и репрезентативности, а также методы сбора: опросы, непрерывный сбор данных и автоматизированная передача информации.

Выводы. Уникальность российской системы статистического учета в здравоохранении заключается в сплошной регистрации каждого случая заболевания в медицинских организациях. Внедрение современных цифровых решений, основанных на первичных данных, соответствует основным принципам статистики. Это позволит упростить работу с информацией, повысит ее точность и доступность для оперативного реагирования на изменения в сфере здравоохранения.

Ключевые слова: *сбор статистических данных, метод, принципы, информатизация здравоохранения, анализ и обработка данных, иностранный опыт.*

Для цитирования: *Рябова М.А., Голубев Н.А., Поликарпов А.В. Международные подходы к сбору и обработке государственной статистики. Врач и информационные технологии. 2025; 1: 30-41. doi: 10.25881/18110193_2025_1_30.*

RYABOVA M.A.,

Federal State Budgetary Institution «Central Research Institute of Organization and Informatization of Healthcare» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: riabova.marina.2004@mail.ru

GOLUBEV N.A.,

PhD, Federal State Budgetary Institution «Central Research Institute of Organization and Informatization of Healthcare» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: golubev@mednet.ru .

POLIKARPOV A.V.,

PhD, Federal State Budgetary Institution «Central Research Institute of Healthcare Organization and Informatization» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia,
e-mail: polikarpov@mednet.ru

INTERNATIONAL APPROACHES TO THE COLLECTION AND PROCESSING OF GOVERNMENT STATISTICS

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_30

Abstract. *Background. The need for effective health management requires the improvement of health statistics. Current methods of data collection are limited and inaccurate. The Digital Transformation Strategy until 2030 aims to create a secure and reliable health information infrastructure using domestic technologies.*

Aim. To analyze the existing methods of collecting and analyzing medical statistics in different countries..

Methods. To obtain information, we searched for relevant studies published in eLibrary, Refseek, Virtual Learning Resources Center, Yandex and Google databases. The search strategy was based on such key words and word combinations in Russian and English as “statistics”, “collection”, “analysis”.

Results. The study identified key methods of development of medical statistics collection in Russia and worldwide, focusing on accuracy and completeness of data. The principles of confidentiality, coverage, quality, computability, regularity and representativeness were analyzed, as well as collection methods: surveys, continuous data collection and automated information transfer.

Conclusion. The uniqueness of the Russian system of statistical accounting in healthcare lies in the continuous registration of each case of disease in medical organizations. The introduction of modern digital solutions based on primary data is in line with the basic principles of statistics. This will simplify the work with information, increase its accuracy and accessibility for prompt response to changes in the healthcare sector.

Keywords: *statistical data collection, method, principles, health informatization, data analysis and processing, foreign experience.*

For citation: *Ryabova M.A., Golubev N.A., Polikarpov A.V. International approaches to the collection and processing of government statistics. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 30-41. doi: 10.25881/18110193_2025_1_30.*

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире система здравоохранения сталкивается с большим объемом информации о состоянии здоровья населения, заболеваемости и ресурсах здравоохранения. Статистические данные лежат в основе разработки планов развития и формирования ключевых направлений для системы здравоохранения [1]. Сегодня доступна широкая палитра статистической информации: оперативные данные, информация из регистров и паспортов медицинских организаций, а также данные федерального и отраслевого статистического наблюдения. Эти данные становятся основой для различных информационных аналитических систем, таких как АСИР и ЕМИСС [2], а также систем поддержки принятия управленческих решений.

Сбор статистических данных является основой понимания социальных, экономических и демографических процессов, происходящих в обществе. Статистические данные используются для оценки эффективности национальных проектов и принятия решений об их продолжении, расширении или закрытии. Для мониторинга ситуации в области здравоохранения, тенденций, прогресса и результативности систем здравоохранения требуются данные из множества источников по широкому спектру вопросов здравоохранения.

Традиционные методы сбора статистических данных, основанные на бумажных анкетах и отчетах, имеют ряд ограничений. Они характеризуются низкой скоростью обработки данных, высокой вероятностью ошибок и сложностью анализа больших объемов информации. В связи с этим, возрастает актуальность внедрения современных информационных технологий в систему сбора и анализа медицинской статистики.

Ключевым компонентом поддержки, оказываемой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) государствам-членам, является укрепление их потенциала в области сбора, компилирования, управления, анализа и использования данных о состоянии здоровья, в основном получаемых из популяционных источников (обследования домашних хозяйств, системы гражданской регистрации событий жизнедеятельности) и институциональных

источников (административная и оперативная деятельность медицинские организации) [3]. Таким образом, актуален вопрос международного опыта при сборе и обработки медико-статистических данных.

Цель исследования – провести сравнительный анализ существующих методов сбора и обработки медицинской статистики в разных государствах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения информации выполнен поиск релевантных исследований, опубликованных в электронных базах eLibrary, Refseek, Virtual Learning Resources Center, Yandex и Google. Стратегию поиска составляли такие ключевые слова и словосочетания на русском и английском языках, как «статистика», «сбор», «анализ».

Каждый текст (на английском и русском языках) рассматривался независимо от даты его издания и языка, на котором он опубликован. Отбор осуществлялся путем изучения названий, краткого содержания и полнотекстовых статей. Для выявления, отбора и критической оценки соответствующих исследований использовался систематический метод.

Для включения публикации в обзор рассматривались следующие критерии: статья должна содержать информацию о методах сбора и обработки данных в зарубежных странах, а также анализировать современные тенденции в этой области. В результате поиска найдено 155 статей, исключая дубликаты. На первом этапе исключено 115 статей, которые, исходя из анализа названий и аннотаций, не соответствовали предмету исследования. Из 40 отобранных публикаций, было удалено еще 16 публикаций, так как в них отсутствовали конкретные сведения о месте проведения исследования или конкретном упоминании метода обработки статистических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Современная система медицинской статистики – это динамично развивающаяся структура, которая постоянно совершенствуется в ответ на изменения в отечественной медицине. Ее цель – обеспечить точность и высокое качество данных, непрерывно адаптируясь к

новым реалиям и вызовам [2]. Система мировой статистики здоровья является сложной сетью глобальных, региональных и национальных систем, собирающих и анализирующих информацию о состоянии здоровья. Эти системы играют ключевую роль в сборе, анализе и распространении статистической информации о состоянии здоровья населения среди правительств и международных организаций для улучшения глобального здравоохранения [4]. Принципы и методы сбора статистики могут существенно различаться в разных странах, что обусловлено рядом факторов, включая уровень экономического развития, политическую систему, культурные особенности и технологические возможности.

ВОЗ в 1968 г. определила *десять основных методов и статистических источников* информации: отчеты о смертности и заболеваемости, об эпидемиях и их расследовании, отчеты лабораторий, отчеты о расследовании отдельных случаев, специальные обследования, сведения о животных-переносчиках инфекций, демографические данные, данные по окружающей среде [5].

Универсальные методы сбора статистических данных для стран с разным уровнем развития статистики разрабатываются ВОЗ, которая является координирующим органом в сфере здравоохранения. Она собирает, анализирует и распространяет информацию о состоянии здоровья населения. ВОЗ устанавливает стандарты и руководства по сбору и анализу данных. Она играет важную роль в мониторинге прогресса в достижении Целей устойчивого развития и в выявлении тенденций в сфере здравоохранения путем проведения обследований домашних хозяйств и населения, которые можно быстро провести для сбора репрезентативных данных по приоритетным вопросам здравоохранения, социальной и экономической сферы и политики. Так, WHS+ (World Health Survey Plus) — ведущая программа ВОЗ по обследованию домашних хозяйств и населения, направленная на сбор данных для программ, политики и анализа в области здравоохранения. Она предназначена для получения достоверной, надежной, сопоставимой и своевременной информации о ряде результатов в области здоровья и благополучия

и детерминантах, имеющих приоритетное значение для общественного здравоохранения. WHS+ основана на опыте ВОЗ в сборе, анализе и распространении данных обследований домашних хозяйств в более чем 101 стране. ВОЗ предоставляет странам систему сбора данных для мониторинга их прогресса в достижении показателей в области охраны здоровья населения [6].

Таким образом, одним из ключевых методов сбора статистических данных являются **опросы**. Для проведения опросов используются различные методики, включая анкетирование и глубинные интервью по телефону, почте и личной встрече. В зависимости от плана и масштаба обследования могут собираться данные по репрезентативной выборке людей. Опросы могут иметь недостатки, такие как сложность получения подробной информации и возможность искажения данных из-за субъективных факторов, влияющих на ответы респондентов.

Так, в США отсутствует полная и своевременная система учета амбулаторных пациентов, поэтому данные получают из выборочных обследований и коммерческих баз данных [7–8]. Конференция AMIA, проведенная в Сан-Франциско в 2008 г., подчеркнула важность научно-обоснованной медицинской помощи, основанной на информационных технологиях, клинических исследованиях и управлении знаниями. Была обозначена потребность непрерывного сбора фактических данных и необходимость развития методов обработки статистической информации для улучшения медицинской практики и принятия управленческих решений в сфере здравоохранения [9].

В России для сбора данных о заболеваемости используется **сплошная регистрация данных**, предполагающая фиксацию каждого случая заболевания в медицинских учреждениях. Этот метод, несмотря на свою сложность, считается наиболее значимым, так как обеспечивает полноту и достоверность информации. Идеальная форма регистрации должна быть простой, ясной и однозначной, собирая только необходимую информацию, чтобы исключить ошибки и неточности. Медицинские записи, содержащие данные о диагнозе, лечении и результатах обследований, являются наиболее достоверным источником информации

о состоянии здоровья населения. Современная система статистической отчетности медицинских организаций показала свою эффективность и устойчивость, опираясь на этот принцип. Для обеспечения качества статистических данных используются сопоставимые методы контроля медико-статистической информации, которые применяются на всех уровнях здравоохранения: при оказании амбулаторной помощи (поликлиники, семейные врачи), стационарной (больницы, клиники), а также в рамках деятельности научных центров (национальные медицинские исследовательские центры, клиники ВУЗов), что позволяет обеспечить надежность данных и их использование для принятия обоснованных решений [2].

В процессе обработки информации, особенно в здравоохранении, ошибки могут возникнуть на разных этапах, начиная от ручного ввода и заканчивая передачей между системами. Германия столкнулась с этой проблемой, когда данные о здравоохранении собирались в различных, часто несовместимых системах управления практикой. Для решения этой проблемы была разработана модель автоматизированной передачи данных, основанная на использовании метода **административных данных**, которые представляют собой информацию, собираемую государственными органами в рамках административной деятельности. Эта модель позволяет собирать данные в месте оказания медицинской помощи, извлекать их из различных систем управления практикой и автоматически переносить в электронные формы отчетов о случаях в системах, используемых для клинических исследований. Это позволяет устранить разрыв между сбором данных и требованиями регулирующих органов, обеспечивая при этом соответствие общему регламенту по защите данных. Пример Германии показывает, что безопасная и автоматизированная передача данных от лечащего врача в регулирующий орган возможна, сокращает трудозатраты, экономит ресурсы и обеспечивает высокое качество данных [10].

Одним из перспективных методов сбора медицинской статистики являются **регистры**, представляющие собой систематический учет информации о конкретных событиях или

характеристиках. Внедрение современных информационных систем в процесс сбора и обработки медицинских данных может значительно повысить оперативность и точность этого процесса. Система обработки регистровых записей позволяет получать актуальную информацию о здоровье населения, заболеваемости, смертности и других показателях в режиме реального времени, что позволит оперативно выявлять тенденции и закономерности, а также прогнозировать развитие ситуации.

Принципы и методы сбора статистических данных тесно связаны между собой и составляют единую систему, обеспечивающую получение надежных и корректных результатов.

Каждый из *принципов* сбора статистических данных является ключевым для обеспечения достоверности и релевантности медико-статистической информации [11]. К основным принципам статистики можно отнести:

- принцип конфиденциальности;
- полноты охвата;
- качества данных;
- вычислимости;
- регулярности сбора данных;
- репрезентативности.

Рассмотрим их применение в части влияние на процесс сбора, обработки и интерпретации данных.

Принцип конфиденциальности включает в себя защиту персональных медицинских данных, что является критически важным аспектом сбора статистики. Статистическое управление Великобритании и Управление национальной статистики Великобритании (ONS) демонстрируют комплексный подход к этому вопросу, основанный на принципах общего регламента по защите данных (GDPR). Обработка данных осуществляется на законных основаниях с информированием субъектов данных о целях и способах использования информации. Сбор данных ограничен конкретными целями, а их использование соответствует заявленным задачам. Собираются и хранятся только минимально необходимые данные, которые должны быть точными и актуальными. Данные не должны храниться дольше, чем это необходимо, а также применяются соответствующие технические и организационные меры для их защиты. ONS обеспечивает

прозрачность своей деятельности, публикуя подробную информацию о методах сбора и обработки данных. Это позволяет укрепить доверие общества к статистическим исследованиям и гарантирует этическое и ответственное использование ценной медицинской информации для улучшения здоровья населения [12]. В России Федеральный закон от 27.07.2006 №152-ФЗ «О персональных данных» защищает всю личную информацию людей, включая медицинские данные. При сборе статистики в здравоохранении данные о пациентах деперсонализируются: убирается информация, позволяющая идентифицировать конкретного человека, что позволяет использовать статистику для анализа и улучшения здравоохранения, не нарушая приватность пациентов.

Для сохранения информации о пациентах используется «Главный индекс пациентов» (ГИП), который является подсистемой «Интегрированной электронной медицинской карты» (ИЭМК) Единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ). ГИП ИЭМК предназначен для хранения персональных данных пациента и идентификаторов пациента в медицинских информационных системах медицинских организаций, подключенных к ЕГИСЗ. Данные пациента в подсистему ГИП ИЭМК направляет и обновляет медицинская организация при помощи запроса из медицинской информационной системы [13].

В целях обеспечения **полноты охвата** в Южной Корее предложили создание универсальной модели общей платформы обмена медицинской информацией. Эта модель поддерживает открытые интерфейсы для реализации различных функций — реестр документов, хранилище информации о пациентах и другие. Она поддерживает обмен медицинской информацией между медицинскими организациями и способствует улучшению координации и непрерывности медицинской помощи [14].

Российская система учета статистических данных отличается централизованным подходом, где Федеральная служба государственной статистики (Росстат) собирает информацию со всех регионов страны, обеспечивая единый методологический подход к сбору и обработке информации. В Российской Федерации

нарушение порядка предоставления первичных статистических данных или несвоевременное предоставление этих данных, либо предоставление недостоверных первичных статистических данных влечет ответственность, установленную Кодексом Российской Федерации об административных правонарушениях. Обязанность предоставления административных данных предусмотрена статьей 8 Федерального закона от 29 ноября 2007 г. №282-ФЗ «Об официальном статистическом учете и системе государственной статистики в Российской Федерации». Важно отметить, что Министерство здравоохранения Российской Федерации не только контролирует соблюдение правил, но и активно поддерживает развитие системы сбора и обработки медицинской статистики. Так, ЕГИСЗ играет ключевую роль в унификации сбора данных, обеспечении их доступности и безопасности. Государство предоставляет финансовую и методическую помощь для совершенствования ЕГИСЗ, что позволяет повысить качество медицинской статистики и сделать ее более эффективным инструментом для принятия управленческих решений [15].

Для улучшения качества в системе сбора статистических данных и решения проблемы двойного ввода данных, которая возникает при сотрудничестве медицинских организаций и использовании разных систем для их записи, в Германии был предложен метод объединённого электронного сбора данных (fEDC). Этот метод позволяет создать централизованную систему, в рамках которой были определены четыре ключевых требования: доступность определений форм; интеграция с системами электронных медицинских карт; локальный контроль данных; соблюдение принципов обмена данными. Благодаря применению метода fEDC и новой архитектуры системы сбора данных, удалось значительно улучшить процесс сбора статистических данных, включая сокращение затрат на ввод данных, улучшение качества информации, повышение эффективности и надёжности сбора и анализа данных [15].

Российская система статистического учета является важным инструментом управления и развития экономики, предоставляя достоверную информацию о ключевых аспектах общественной жизни. В этом контексте значимую

роль играет методологически выверенная система учетной и отчетной медицинской документации, а также иерархический путь сбора и обработки информации. Росстат совместно с Министерством здравоохранения Российской Федерации устанавливает единые стандарты и методики, проводит регулярные обучения специалистов, что способствует высокому уровню квалификации персонала. Система контроля качества включает в себя внутренний, региональный и федеральный уровни, что позволяет оперативно выявлять и устранять несоответствия [2]. Достаточное финансирование обеспечивает необходимые ресурсы для совершенствования методов сбора и анализа данных, а внедрение единой информационной системы упрощает обмен информацией и минимизирует риски дублирования данных. Высокая мотивация специалистов обеспечивает ответственный подход к сбору и отчетности по медицинской статистике.

Проблему **вычислимости данных** в Соединенных Штатах Америки призвано решать инновационное программное обеспечение QMONI для оценки качества медицинской информации на веб-сайтах медицинских центров университетов. QMONI обладает открытым исходным кодом и высокой масштабируемостью, существенно превосходя ручное оценивание качества информации в Интернете. Инструмент вычисляет 8 различных показателей качества информации и позволяет оценить ее по различным медицинским темам, включая COVID, рак, контрацепцию и др. QMONI показал тематическую универсальность и устойчивость к изменениям на веб-сайтах, что позволяет проводить долгосрочный мониторинг качества информации. QMONI способен проводить периодические и тщательные анализы веб-сайтов и может использоваться как инструмент для исследований в области здравоохранения, обеспечивая последующее развитие и расширение применения в этой области [17].

Государственная информационная система «Цифровая аналитическая платформа предоставления статистических данных» (ГИС ЦАП), разработанная Росстатом, предоставляет возможность эффективно собирать, обрабатывать и анализировать статистические данные, что улучшает доступность информации для

пользователей и способствует принятию обоснованных решений. Она является одним из важнейших элементов национальной системы управления данными, созданной в рамках нацпрограммы «Цифровая экономика». Её цель – переход к новой структурной и функциональной модели производства и распространения статистических данных в России. В этой модели должны реализовываться принципы единого информационного пространства данных, прослеживаемости и взаимосвязи понятий и объектов статистического учета, однократного предоставления первичных статистических данных и их многократного последующего использования. Данные из платформы будут доступны всем категориям пользователей информации – органам власти, бизнесу, экспертам и международному сообществу.

Чтобы обеспечить **регулярность сбора данных**, Канадский институт медицинской информации поддерживает несколько баз данных HRH (Human Resource for Health) как часть всеобъемлющей национальной информационной системы управления человеческими ресурсами в области здравоохранения (HRHIS). Для улучшения сбора статистических данных создается система, основанная на данных от краевых больниц и регионов. Благодаря этой технологии данные о медицине собираются в режиме реального времени прямо от врачей и медсестер и поступают в базу данных, что позволяет отслеживать эффективность и качество услуг. HRHIS не только собирает данные, но и предоставляет инструменты для анализа и использования этих данных [18].

Система статистического учета в России характеризуется высокой степенью детализации и широким охватом. Росстат регулярно проводит переписи и обследования предприятий, собирая информацию об их деятельности, объемах производства, финансовых показателях и занятости. Российская система статистического учета отличается высоким уровнем автоматизации, благодаря внедрению информационных технологий, что позволяет повысить оперативность и точность статистической информации [19]. Росстат реализует мероприятия для совершенствования методологии сбора данных и повышения квалификации своих сотрудников. Главной задачей Федеральной

службы государственной статистики является удовлетворение разнообразных потребностей в полной, разнообразной и объективной статистической информации [20].

Обеспечению **репрезентативности** данных в сфере обработки медицинской статистики служит появление новых программ и приложений, которые упрощают работу с большими объемами данных и повышают точность анализа. Опыт Танзании, где была внедрена система интерактивной привязки записей в точках контакта (PIRL), демонстрирует эффективность таких решений. PIRL связывает медицинские записи из местной медицинской организации с системой здравоохранения в сельских районах, где отсутствуют уникальные идентификаторы и существуют проблемы с качеством данных. Программное обеспечение PIRL использует вероятностный алгоритм, чтобы найти и ранжировать потенциальные совпадения в базе данных, позволяя проводить привязку записей даже в присутствии пациента, что устраняет неопределенность и использует дополнительную информацию для принятия решения между несколькими потенциальными совпадениями. В результате PIRL обеспечивает более точное связывание записей по сравнению с чисто автоматизированными подходами, что подтверждает важность интерактивного взаимодействия с пользователем при работе со статистическими данными [21].

Министерство здравоохранения Российской Федерации использует единые подходы к расчету показателей деятельности медицинских организаций, основанные на классических правилах статистики. Наиболее востребованные показатели включаются в системы поддержки управленческих решений. Так, АСИР (Автоматизированная система информирования руководителя) значительно упрощает и ускоряет работу с данными. Она позволяет оперативно находить нужные статистические показатели, формировать наборы данных, сравнивать показатели с нормативами и визуализировать данные в виде таблиц и графиков. В системе АСИР в здравоохранении дашборды и визуализация играют ключевую роль в предоставлении руководителям актуальной и наглядной информации о работе учреждений, что позволяет быстро анализировать

ключевые показатели, выявлять тенденции и принимать обоснованные решения. Автоматизация корпоративной отчетности, интегрированная с системой АСИР, упрощает сбор, обработку и представление данных, значительно экономя время сотрудников и повышая точность информации. Автоматизация рутинных операций по хранению и обработке данных повышает эффективность системы сбора и анализа медицинской статистики, улучшает качество медицинской помощи и оптимизирует управление здравоохранением [22].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В медицине важно эффективно использовать собираемые данные для мониторинга здравоохранения. Их количество должно быть сокращено для достоверности и сопоставимости на национальном и международном уровнях. Глубокий анализ приоритетных показателей здоровья и общественного здравоохранения позволит принимать более эффективные решения. Методика мониторинга должна быть ориентирована на получение достоверной и надежной информации [23].

Современная система здравоохранения сталкивается с проблемой обработки растущего объема медицинских данных. Традиционные методы сбора и анализа информации уже не справляются с этой задачей, делая невозможным оперативное реагирование на изменения в сфере здравоохранения и принятие своевременных решений. Россия нуждается в переходе на новый уровень сбора и обработки данных, используя современные информационные технологии. Цифровая модель формирования отчетной документации из первичных данных позволит автоматизировать сбор информации, повысить ее точность и оперативность, снизив нагрузку на медицинский персонал. Внедрение такой модели позволит не только оптимизировать работу медицинских организаций, но и улучшить планирование развития здравоохранения на основе реальных потребностей населения [24].

В ходе исследования были рассмотрены различные методы сбора и анализа медицинской статистики: традиционные и современные. Информатизация здравоохранения играет ключевую роль в повышении эффективности

системы сбора и обработки данных, сокращая время обработки, снижая вероятность ошибок и обеспечивая доступность информации. Несмотря на это, внедрение новой системы требует решения ряда задач, таких как обеспечение информационной безопасности и защиты персональных данных пациентов, а также разработка единых стандартов и протоколов для сбора, хранения и обмена медицинскими данными.

Неэффективность сбора и анализа данных о здоровье населения из-за разрозненности информации затрудняет получение цельной картины и принятие решений. Решение – использование программного обеспечения, стандартизирующего данные и позволяющего анализировать информацию, сравнивая данные между регионами [5]. Использование больших данных, искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет выявлять закономерности, прогнозировать заболеваемость и разрабатывать персонализированные подходы к лечению. Развитие системы сбора и анализа медицинской статистики – это непрерывный процесс, требующий постоянного совершенствования методов и технологий.

Таким образом, разработка универсальных подходов к сбору и обработке статистических данных требует комплексного подхода и перехода на новый уровень сбора данных. В последние годы в России предпринимаются шаги по модернизации системы сбора и обработки медицинских статистических данных. Внедряются электронные медицинские карты, развиваются информационные системы в здравоохранении, и все больше внимания уделяется использованию больших данных для анализа и прогнозирования. Эти подходы активно применяются для мониторинга национальных

проектов и помощи в принятии обоснованных решений, направленных на достижение их целей. Внедрение современных информационных технологий в систему сбора и обработки медицинских данных является важным шагом на пути к созданию современной эффективной системы здравоохранения в России.

Выводы

1. Уникальность российской системы статистического учета в здравоохранении заключается в сплошной регистрации данных, предполагающей фиксацию каждого случая заболевания в медицинских организациях. Важно учитывать специфику этой системы при разработке и внедрении новых технологий и методов анализа данных.
2. Для повышения эффективности системы сбора и анализа медицинской статистики необходимо постоянное развитие информатизации отрасли. Внедрение современных технологий, таких как электронные медицинские карты, системы электронного здравоохранения, большие данные и искусственный интеллект, позволит упростить работу с данными, повысить их точность и доступность, а также открыть новые возможности для анализа и прогнозирования.
3. Переход от традиционной системы заполнения годовых отчетов к новой системе, основанной на первичных данных, обновляемых в режиме реального времени, соответствует основным принципам статистики, и может позволить оперативно реагировать на изменения в сфере здравоохранения, принимать управленческие решения и разрабатывать эффективные стратегии управления.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.04.2024 N 959-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации здравоохранения». Доступно по: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84471.html>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.04.2024 N 959-r «Ob utverzhdanii strategicheskogo napravleniya v oblasti cifrovoj transformacii zdavoohraneniya». Available at: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84471.html>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
2. Голубев Н.А., Поликарпов А.В., Огрызко Е.В. Исторические аспекты методологии сбора и обработки медико-статистической информации в Российской Федерации // Социальные аспекты здоровья населения. – 2022. [Golubev NA, Polikarpov AV, Ogryzko EV. Historical aspects of the methodology for collecting and processing medical statistical information in the

- Russian Federation. Social aspects of public health. 2022. (In Russ.)) doi: 10.21045/2071-5021-2022-68-5-13.
3. Инструменты сбора и анализа данных В.О.З. Доступно по: <https://www.who.int/data/data-collection-tools>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Instrumenty sbora i analiza dannyh V.O.Z. Available at: <https://www.who.int/data/data-collection-tools>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 4. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). Доступно по: <https://www.who.int/ru>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya (VOZ). Available at: <https://www.who.int/ru>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 5. Black KD, et al. The population health information system: data analysis and software. Medical care 33 (12 additional). 1995. doi: 10.1097/00005650-199512001-00013.
 6. Обзор состояния здоровья в мире плюс. (WHS+). Доступно по: <https://www.who.int/data/data-collection-tools/world-health-survey-plus>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Obzor sostoyaniya zdorov'ya v mire plyus. (WHS+). Available at: <https://www.who.int/data/data-collection-tools/world-health-survey-plus>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 7. Сафонов С.М. Совершенствование деятельности кабинета медицинской статистики городской поликлиники. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-deyatelnosti-kabineta-meditsinskoi-statistiki-gorodskoj-polikliniki>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Safonov S.M. Sovershenstvovanie deyatelnosti kabineta medicinskoj statistiki gorodskoj polikliniki. Available at: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-deyatelnosti-kabineta-meditsinskoi-statistiki-gorodskoj-polikliniki>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 8. Методы сбора первичных статистических данных в медицине и здравоохранении. Доступно по: <https://ivgmu.ru/attachments/52079>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Metody sbora pervichnyh statisticheskikh dannyh v medicine i zdavoohranenii. Available at: <https://ivgmu.ru/attachments/52079>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 9. Blumrozen M, Detmer DE. Informatics, evidence-based care and research; implications for national policy: report of the American Association of Medical Informatics Conference on Health Policy. J Am-MedInformAssoc. 2010; 17(2): 115-123.
 10. Muller K, et al. Automated electronic health record to electronic data capture transfer in clinical studies in the German health care system: feasibility study and gap analysis. 2023. doi: 10.2196/47958.
 11. Федеральный закон от 29.11.2007 №282-ФЗ «Об официальном статистическом учете и системе государственной статистики в Российской Федерации». Доступно по: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72844. Ссылка активна на 27.09.2024. [Federal'nyj zakon ot 29.11.2007 №282-FZ «Ob oficial'nom statisticheskom uchete i sisteme gosudarstvennoj statistiki v Rossijskoj Federacii». Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72844. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 12. Статистическое управление Великобритании и Управление национальной статистики (ONS). Доступно по: <https://www.ons.gov.uk/aboutus/transparencyandgovernance/datastrategy/datapolicies/collectingandusinghealthdata>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Statisticheskoe upravlenie Velikobritanii i Upravlenie nacional'noj statistiki (ONS). Available at: <https://www.ons.gov.uk/aboutus/transparencyandgovernance/datastrategy/datapolicies/collectingandusinghealthdata>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
 13. Практическое инструктивно-методическое пособие по статистике здравоохранения. Утверждено приказом Росстата от 22.11.2010 №09 (согласовано с Минздравсоцразвития России, письмо от 16.09.2010 №14-6/242938, и Минэкономразвития России, письмо от 21.10.2010 №19866-АЛ/Д04). Доступно по: https://управление-здравоохранением.пф/publ/medicinskaja_statistika/mezhdunarodnyj_opyt_organizacii_statistiki_zdravookhraneniya/28-1-0-251. Ссылка активна на 27.09.2024. [Prakticheskoe instruktivno-metodicheskoe posobie po statistike zdavoohraneniya. Uverzhdeno prikazom Rosstata ot 22.11.2010 №09 (soglasovano s Minzdravsocrazvitiya Rossii, pis'mo ot 16.09.2010 №14-6/242938, i Minekonomrazvitiya Rossii, pis'mo ot 21.10.2010 №19866-AL/D04). Available at: https://управление-здравоохранением.пф/publ/medicinskaja_statistika/mezhdunarodnyj_opyt_organizacii_statistiki_zdravookhraneniya/28-1-0-251. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]

14. Lee M, et al. Development of a common health information exchange platform for the implementation of a nationwide health information network in South Korea. 2015. doi: 10.4258/hir.2015.21.1.21.
15. Федеральный проект «Создание единого цифрового контура в здравоохранении на основе единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ)». Доступно по: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravoohranenie/tsifra>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Federal'nyj proekt «Sozdanie edinogo cifrovogo kontura v zdravoohranenii na osnove edinoj gosudarstvennoj informacionnoj sistemy v sfere zdravoohraneniya (EGISZ)». Available at: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravoohranenie/tsifra>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
16. Hansinger M, et al. Federated electronic data capture (fEDC): Architecture and Prototype. 2023. doi: 10.1016/j.jbi.2023.104280.
17. Kulkarni A, et al. Quantifying the quality of web-based health information on student medical center websites using software tools: design and development study. 2022. doi: 10.2196/32360.
18. Обычные системы медицинской информации (RHIS) во Всемирной организации здравоохранения. Доступно по: <https://www.who.int/data/data-collection-tools/health-service-data>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Obychnye sistemy medicinskoj informacii (RHIS) vo Vsemirnoj organizacii zdravoohraneniya. Available at: <https://www.who.int/data/data-collection-tools/health-service-data>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
19. Поликарпов А.В., Голубев Н.А., Рябков И.В. и др. Модель информационного взаимодействия в рамках системы сбора медицинской статистики // Врач и информационные технологии. – 2023. – №1. – С.62-77. [Polikarpov AV, Golubev NA, Ryabkov IV, et al. A model of information interaction within the framework of the medical statistics collection system. Doctor and information technology. 2023; 1: 62-77. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193_2023_1_62.
20. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Доступно по: https://ru.wikipedia.org/wiki/Федеральная_служба_государственной_статистики. Ссылка активна на 27.09.2024. [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki (Rosstat). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Федеральная_служба_государственной_статистики. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]

21. Rentsch KT, et al. Point-of-contact interactive record linkage (PIRL): a software tool to prospectively link demographic surveillance and health facility data. 2017. doi: 10.12688/gatesopenres.12751.2.
22. Стародубов В.И., Поликарпов А.В., Голубев Н.А., Лисненко А.А. Модернизация «Автоматизированной системы информирования руководителя» (АСИР) (ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации). [Starodubov V.I., Polikarpov A.V., Golubev N.A., Lisnenko A.A. Modernization of the "Automated Manager Information System" (ASIR) (Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Healthcare Organization and Informatization" of the Ministry of Health of the Russian Federation). (In Russ).]
23. Сафонов С.М. Совершенствование деятельности кабинета медицинской статистики городской поликлиники. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-deyatelnosti-kabineta-meditsinskoi-statistiki-gorodskoi-polikliniki>. Ссылка активна на 27.09.2024. [Safonov S.M. Sovershenstvovanie deyatelnosti kabineta medicinskoj statistiki gorodskoj polikliniki. Available at: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-deyatelnosti-kabineta-meditsinskoi-statistiki-gorodskoi-polikliniki>. Accessed 27.09.2024. (In Russ.)]
24. Кобякова О.С., Голубев Н.А., Поликарпов А.В., Сидоров К.В. Модель автоматизации системы сбора статистической информации о показателях системы здравоохранения на основании первичных данных // Профилактическая медицина. – 2023. – Т.26, №1. – С.11-16. [Kobyakova OS, Golubev NA, Polikarpov AV, Sidorov KV. Automation model of the system for collecting statistical information on health system indicators based on primary data. Preventive medicine. 2023; 26(1): 11-16. (In Russ.)] doi: 10.17116/profmed20232601111.

ЦЫГАНКОВ В.А.,

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия,
e-mail: Vladimir.Tsygankov27@yandex.ru

КУДРИН Р.А.,

д.м.н., доцент, ФГБОУ ВО ВолгГМУ Минздрава России, г. Волгоград, Россия,
e-mail: rodion.kudrin76@yandex.ru

КАТАЕВ А.В.,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия, e-mail: alexander.kataev@gmail.com

ШАБАЛИНА О.А.,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия, e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com

САДОВНИКОВА Н.П.,

д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия, e-mail: n_sadovnikova@vstu.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СЕГМЕНТАЦИИ И АНАЛИЗУ СТРУКТУР ГОЛОВНОГО МОЗГА: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_42

Аннотация. В настоящее время искусственный интеллект является одной из наиболее быстро развивающихся областей человеческого знания. Данная тематика имеет большое значение для науки и практики, в целом, и для медицины, в частности. Применение технологий искусственного интеллекта к сегментации зон головного мозга и выявлению аномальных участков особенно востребовано и перспективно в области нейрофизиологии, нейрохирургии, психиатрии, клинической психологии и других медицинских дисциплин. В данной работе проведено исследование существующих методов автоматизированной сегментации и анализа данных о структуре и функциональном состоянии головного мозга, а также метрик, применяемых для оценки эффективности данного подхода.

Цель: выявление нерешённых проблем и поиск тенденций в разработке методов сегментации и выявления аномальных участков головного мозга, а также определение наиболее эффективных методов и способов их улучшения.

Материалы и методы. Работа выполнена с использованием методологии Systematic Mapping Study (SMS). Данное исследование ограничивается предметной областью, связанной с сегментацией зон головного мозга и определением в нём аномальных участков.

Результаты. Основные результаты исследования представлены в виде классификационных таблиц и ментальной карты. Показано, что целью рассмотренных исследований является повышение точности при сегментировании зон головного мозга и нахождении аномальных участков. Такая метрика, как время обработки данных, применяется для оценки эффективности метода при малом количестве исследований, а в большинстве случаев вообще не рассматривается. При этом скорость обработки изображений в зависимости от применяемого метода измеряется минутами, что существенно ограничивает возможность использования данного подхода в экстренных ситуациях, в том числе при угрозе жизни человека.

Заключение. Для анализа данных о структуре и функциональном состоянии головного мозга в режиме реального времени требуется модификация уже разработанных методов энцефальной сегментации, а также разработка новых, более эффективных подходов. При этом скорость обработки данных должна быть соизмерима со временем вынесения срочного заключения о состоянии головного мозга человека.

Ключевые слова: нейронные сети, искусственный интеллект, машинное обучение, сегментация головного мозга, нейросети для диагностики мозговой дисфункции, искусственный интеллект в медицине.

Для цитирования: Цыганков В.А., Кудрин Р.А., Катаев А.В., Шабалина О.А., Садовникова Н.П. Современные подходы к сегментации и анализу структур головного мозга: проблемы и решения. *Врач и информационные технологии.* 2025; 1: 42-57. doi: 10.25881/18110193_2025_1_42.

TSYGANKOV V.A.,

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, e-mail: Vladimir.Tsygankov27@yandex.ru

KUDRIN R.A.,

DSc, Associate Professor, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia,
e-mail: rodion.kudrin76@yandex.ru

KATAEV A.V.,

PhD, Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,
e-mail: alexander.kataev@gmail.com

SHABALINA O.A.,

PhD, Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,
e-mail: O.A.Shabalina@gmail.com

SADOVNIKOVA N.P.,

DSc, Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,
e-mail: n_sadovnikova@vstu.ru

MODERN APPROACHES TO SEGMENTATION AND ANALYSIS OF BRAIN STRUCTURES: PROBLEMS AND SOLUTIONS

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_42

Abstract. Currently, artificial intelligence is one of the most rapidly developing areas of human knowledge. This topic is of great importance for science and practice, in general, and for medicine, in particular. Application of artificial intelligence technologies to the segmentation of brain areas and detection of abnormal areas is especially demanded and promising in the field of neurophysiology, neurosurgery, psychiatry, clinical psychology and other medical disciplines. This paper investigates existing methods for automated segmentation and analysis of data on the structure and functional state of the brain, as well as metrics used to evaluate the effectiveness of this approach.

Materials and methods. The work was performed using Systematic Mapping Study (SMS) methodology.

This study is limited to the subject area related to segmentation of brain areas and identification of abnormal areas in the brain.

Results. The main results of the study are presented in the form of classification tables and a mental map. It is shown that the purpose of the reviewed research is to improve accuracy in segmenting brain areas and finding abnormal areas. Such a metric as data processing time is used to evaluate the efficiency of the method for a small number of studies, and in most cases it is not considered at all. At the same time, the speed of image processing, depending on the method used, is measured in minutes, which significantly limits the possibility of using this approach in emergency situations, including life-threatening situations.

Conclusion. To analyze data on the structure and functional state of the brain in real time, modification of already developed methods of encephalic segmentation is required, as well as development of new, more efficient approaches. At the same time, the speed of data processing should be commensurate with the time of making an urgent conclusion about the state of the human brain.

Keywords: Neural networks, Artificial intelligence, Machine learning, Brain segmentation, Neural networks for diagnosing brain dysfunction, Artificial intelligence in medicine.

For citation: Tsygankov V.A., Kudrin R.A., Kataev A.V., Shabalina O.A., Sadovnikova N.P. Modern approaches to segmentation and analysis of brain structures: problems and solutions. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 42-57. doi: 10.25881/18110193_2025_1_42.

ВВЕДЕНИЕ

Являясь высшим отделом центральной нервной системы человека, головной мозг (ГМ) контролирует функционирование всех остальных органов. Именно он позволяет людям мыслить, чувствовать, проявлять эмоции, хранить и воспроизводить информацию, принимать решения. В случае повреждения ГМ возможны потеря памяти, расстройства личности, эмоциональные и поведенческие отклонения, нарушения целого организма и отдельных его органов, а в тяжёлых случаях – смерть пациента [1, 2]. Именно поэтому состояние ГМ является ключевым параметром нормальной жизнедеятельности человека. Для медицины в условиях предболезни и болезни представляется весьма актуальной разработка современного подхода к внешнему контролю работы мозга, слежения за его структурными и функциональными изменениями. Это позволит своевременно выявлять и лечить различные варианты энцефалопатии, связанные с сотрясениями ГМ, черепно-мозговыми травмами, сосудистыми, обменными и иными нарушениями [3], а также аномалиями развития, такими как глиома, менингиома, глиоз [4]. При этом ранняя диагностика позволит проводить эффективное лечение с высокой вероятностью полного выздоровления [5].

При современном уровне развития медицины структура и функция ГМ изучаются с помощью таких методов как: магнитно-резонансная томография (МРТ), функциональная (фМРТ) и диффузионная МРТ, магнитоэнцефалография (МЭГ), электроэнцефалография (ЭЭГ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), спектроскопия в ближней инфракрасной области (NIRS),

прямая электрическая стимуляция (ПЭС), навигационная транскраниальная магнитная стимуляция (НТМС) и др. [6–13] (Рисунок 1).

Обработкой и анализом результатов, полученных с помощью этих и других методов диагностики, занимается врач, который ставит диагноз и назначает пациенту лечение. Однако вследствие человеческого фактора на данном этапе могут быть допущены ошибки: объективные (почти или полностью независимые от врача) и субъективные (причиной которых является сам врач) [14].

По статистике из всех врачебных ошибок объективные составляют не более 38%, а остальные являются субъективными [15]. Именно поэтому является актуальным использование систем на основе искусственного интеллекта (ИИ) для сведения к минимуму количества субъективных ошибок в медицине. Представляется целесообразным применение машинного обучения на основе искусственных нейронных сетей для существенного повышения точности диагностики нейропатологии при визуализации структур ГМ.

ИИ может работать автономно, не подвержен субъективизму и человеческому фактору. Это позволяет полностью исключить субъективные и уменьшить количество объективных ошибок при обработке результатов, что значительно повысит точность постановки диагноза и уменьшит нагрузку на врача [24]. В настоящее время точность ИИ при диагностике в медицине может достигать 73%, что превосходит результаты 17 из 18 врачей, а различные наборы данных для обучения позволяют «настроить» машинный интеллект в соответствии с особыми требованиями и условиями [16, 17]. Исходя из этого, в



Рисунок 1 — Ментальная схема области знаний «Методы картирования головного мозга».

настоящее время наблюдается бурное развитие и внедрение систем на основе ИИ в сферу здравоохранения. Однако для увеличения количества верных диагнозов необходимы более совершенные методы сегментации и обнаружения аномальных участков ГМ.

В ряде научных публикаций описаны результаты анализа накопленного опыта в сфере разработки компьютерных методов сегментации ГМ на основе ИИ. Так, в работе [18] проводилось сравнение трёх систем автоматического анализа для выявления ишемического инсульта по КТ-изображениям. В [19] описаны различные группы методов и алгоритмов сегментации опухолей ГМ. Однако сравнительный анализ описанных методов не был представлен. В [20] описаны основные этапы сегментации МРТ-изображений и рассмотрены некоторые методы в рамках данного подхода. В одном из последних исследований [21] приведены результаты анализа влияний на выходные результаты особенностей различных методов диагностики, а также делаются выводы об их эффективности. Однако в данной публикации используется небольшой объём входных данных, что не позволяет в полной мере считать полученные результаты объективными.

В настоящей работе проведена оценка методов сегментации МРТ-изображений и им подобных с учётом наборов данных, методологии, используемых инструментов, а также достоинств и ограничений. Приводится описание основных этапов работы в рамках использования метода сегментации структур ГМ.

Целью данной работы является выявление нерешённых проблем и поиск тенденций в разработке методов сегментации и выявления аномальных участков ГМ, а также определение наиболее эффективных методов и способов их улучшения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данное исследование посвящено обзору текущего состояния исследований по разработке и практическому применению методов сегментации ГМ за период с 2002 по 2024 год и тенденциям дальнейшего развития в данной области. Работа выполнена с использованием методологии Systematic Mapping Study (SMS) [22] по специализированному руководству для выполнения систематических обзоров литературы

по программной инженерии [23]. Данное исследование ограничивается предметной областью, связанной с сегментацией зон ГМ и определением в нём аномальных участков.

В процессе работы были поставлены два исследовательских вопроса.

1. Какие методы ИИ, метрики и обучающие наборы данных применяются для автоматической сегментации ГМ в медицине в настоящее время?
2. Какие результаты были достигнуты за последние несколько лет и каковы тенденции их развития?

В соответствии с методологией SMS исследование проводилось в два этапа.

Этап 1. Определение источников литературы, стратегии поиска, рамок формирования стратегии поиска и критериев отбора.

Этап 2. Анализ, кластеризация и построение карт: в рамках данного этапа проведены кластеризация публикаций и проектирование таблиц с результатами исследования, построение ментальной карты области знаний «Сегментация зон головного мозга».

На первом этапе проведён поиск публикаций в библиографических базах данных eLibrary, ResearchGate, Pubmed, Google Scholar, Springer и CyberLeninka, а также осуществлён анализ информации из открытых интернет-источников с применением поисковой системы Яндекс. Поиск выполнялся по следующим ключевым словам: методы сегментации, машинное обучение, головной мозг, сегментация опухолей, новообразования, головной мозг, МРТ головного мозга. Изначально были найдены 72 статьи (4 статьи из eLibrary, 8 – CyberLeninka, 16 – из поисковой системы Яндекс по запросу «Обнаружение опухолей головного мозга компьютерным зрением», 12 – ResearchGate, 6 – Pubmed, 7 – Google Scholar и 19 – Springer по запросу «Detecting brain tumors using computer vision»).

Сформулированы критерии отбора релевантных публикаций из найденных в первичном исследовании:

- в статье должны быть описаны все этапы обработки данных;
- на основании выходных данных должны быть сегментированы основные отделы ГМ и аномальные образования (при их наличии);

- метод, описанный в статье, должен уметь работать с МРТ-изображениями разного размера и качества;
- методы должны быть протестированы, и в результате их использования должны быть получены конкретные результаты. В работу не включались статьи, в которых:
- отсутствовало описание алгоритма работы или основных компонентов предложенного метода;
- погрешность при обработке изображений превышала 30%;
- назначение метода не соответствовало теме исследования.

В соответствии с заданными критериями была отобрана и сгруппирована по методам сегментации 31 статья (1 из CyberLeninka, 8 из ResearchGate, 2 из Pubmed, 11 из Springer и 9 из поисковой системы Яндекс).

По результатам анализа отобранных статей построены таблицы методов машинного обучения с показателями точности, специфичности и чувствительности, а также дополнительных метрик эффективности методов, составлена ментальная карта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Использование ИИ и искусственных нейронных сетей для диагностики и сегментации зон и аномалий ГМ

ИИ и нейронные сети могут применяться для решения различных медицинских задач:

- а) повышение качества получаемых изображений, устранение шумов и артефактов, улучшение контраста для более точного интерпретирования результатов;
- б) распознавание различных заболеваний и патологий;
- в) анализ данных о состоянии здоровья и истории болезни пациента;
- г) помощь в планировании сложных операций (определение оптимальных путей доступа, предсказание рисков и помощь в принятии обоснованных решений) [24, 25].

В связи с этим развивается направление, связанное с компьютерной диагностикой, в нейрофизиологии по всему миру. В таблице 1 приведены данные о компаниях, занимающихся обнаружением и сегментированием зон ГМ.

Таблица 1 — Компании, занимающиеся развитием диагностических методов, основанных на ИИ, в области нейрофизиологии [26]

Компания	Направления исследований, методы, технологии, программное обеспечение
МОСМЕД	Разработка методов поддержки врачебных решений на основе ИИ; технологии в области компьютерного зрения, лучевых исследований и распознавания речи для управления рабочими станциями; наборы данных для обучения и проверки систем; готовые ИИ-решения; технические и клинические испытания.
Subtle Medical	Программное обеспечение для ускорения и улучшения обработки медицинских изображений на основе ИИ.
Care Mentor AI	Система ИИ для интерпретации результатов лучевых исследований (рентгенологических, КТ, МРТ и маммографии).
RADLogics	Программная платформа анализа медицинских изображений.
Sciberia	Комплекс программных модулей для анализа медицинских изображений с помощью ИИ.
NTechMed CT Brain	Программное обеспечение для диагностики пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения.
Google	Алгоритмы машинного обучения для сегментации и анализа данных МРТ.
IBM	Компьютерные продукты, основанные на ИИ, для обнаружения и классификации опухолей мозга с использованием данных МРТ и КТ.
NVIDIA	Специализированные решения для обработки изображений (NVIDIA DGX).
Siemens Healthineers	Разработка решений для автоматизации анализа медицинских изображений.
Aidoc	Программное обеспечение на основе ИИ для обработки медицинских изображений.
Zebra Medical Vision	Устройства и программное обеспечение для автоматической интерпретации и анализа медицинских изображений.
Subtle Medical	Программное обеспечение для ускорения и улучшения обработки медицинских изображений на основе ИИ.

2. Методы сегментирования зон ГМ и его аномальных участков

Одним из первых методов сегментирования отделов ГМ при помощи вычислительной техники в автоматическом режиме был метод на основе автоматического присвоения нейрoанатомической метки каждому вокселю, опубликованный в 2002 году [27]. Данный подход является достаточно требовательным к машинной памяти и не может быть использован для обработки изображений в реальном времени. Вместе с тем, к настоящему времени появилось большое количество альтернативных методов сегментации.

2.1. Машины опорных векторов (Support Vector Machines / SVM)

В работах [29, 31, 35, 36, 39, 40] для сегментации используется SVM-классификатор совместно с функцией извлечения текстурных элементов на основе матрицы совпадения уровней серого (Gray Level Co-Occurrence Matrix / GLCM). Однако в работе [28] дополнительно задействован расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman Filter / EKF-SVM), а в [25] дискретное вейвлет-преобразование (Discrete Wavelet Transform / DWT).

Метод [32] действует на основе дискретного вейвлет-преобразования и SVM-классификатора.

В работе [33] используется SVM классификатор совместно с кластеризацией по K-средним (K-Means Clustering / KMC), в [37] для извлечения признаков добавляется алгоритм «Oppositional Fruit Fly Algorithm» (OFFA).

В методе [35] одновременно используются SVM, OFFA и вейвлет-преобразование Габора (Gabor Wavelet / IGWT).

Метод [48] позволяет переключаться между алгоритмами отбора признаков, основанными на метаэвристике и энтропийном эксцессе.

В [50] совместно с SVM реализован «Deep Fusion» с целью объединения нескольких моделей.

2.2. Свёрточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network / CNN)

В работе [42] используется классическая CNN. С целью сокращения времени выполнения обычной сети в [45] была использована региональная свёрточная сеть (Regression Convolutional Neural Network / RCNN), а [49] – 2D-свёрточная.

В [47] применена улучшенная глубокая свёрточная нейронная сеть (Deep Convolutional Neural Network / DCNN) с использованием алгоритмов оптимизации Харриса Хоукса (Harris Hawkes Optimization / ННО) и серого градиента.

Метод [52] состоит из классической CNN совместно с гомоморфным вейвлет-фильтром (Homomorphic Wavelet Filter / HWF) и генетического алгоритма сортировки без доминирования (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm / NSGA).

2.3. Нечёткая кластеризация C-средних (Fuzzy c-means / FCM)

В [31] используется FCM с двухуровневыми процессами морфологической реконструкции с последующим установлением порога. В [57] – совместно с методом улучшения контрастности (Balance Contrast Enhancement Technique / BCET). В [29] используется её модифицированная версия OPFCM совместно с адаптивным классификатором k-means.

2.4. Глубокие нейронные сети и их разновидности

Статья [51] описывает процесс классификации при помощи глубокой нейронной сети ODNN (Optimized Deep Neural Network), алгоритма оптимизации Spider Monkey и матрицы совместного возникновения серого уровня (Gray Level Co-occurrence Matrix / GLCM). В [41] используется свёрточная нейронная сеть DCNN, а в [44] – рекуррентная.

2.5. Альтернативные методы

Помимо общепринятых методов при сегментации используются и альтернативные: в работе [56] алгоритм модифицируется для слияния разметок нескольких атласов с целью получения разметки входного изображения; в [54] проводится постпроцессинговая обработка изображений с вычислением внутрочерепного пространства методикой ABC; в [43] для дифференциации областей опухоли используется трёхмерная остаточная сеть Atrous; в [53] при поиске используется комбинация томограмм разной взвешенности с одинаковыми изоцентрами координат; в [27] сегментация проводится на основе анализа главных компонентов; в работе [46] для классификации используется Z-Net Framework; статья [55] описывает модель с использованием нечёткого

деформируемого слияния и алгоритма Dolphin-SCA, обработанного при помощи нелокальных средств NLM (Non-local Means).

3. Обучающие наборы данных и сравнительные метрики

Для обучения моделей используются подготовленные наборы, представляющие собой выборки из исходных данных (Таблица 2).

4. Классификация методов сегментирования зон ГМ и аномальных образований

Был проведён анализ методов для решения задач анализа и сегментации отделов ГМ. Для оценки

информативности диагностических методов в качестве операционных характеристик исследования в большинстве случаев используют такие критерии как чувствительность, специфичность, точность [64]. В некоторых работах используются добавочные метрики в дополнение или вместо классических операционных характеристик исследования для определения эффективности разработанного метода: F-значение, относительная потеря, адекватность отзыва, время обработки, отношение сигнала к шуму и коэффициент ошибки. Предложенные подходы, используемые наборы данных и значения операционных характеристик методов исследования представлены в Таблицах 3, 4.

Таблица 2 — Наборы данных

Набор данных	Описание	Данные	Расширения
Mosmed.ai	Наборы с МРТ и КТ изображениями с различными патологиями.	Рассеянный склероз – 285 записей, внутрочерепное кровоизлияние – 905, ишемический инсульт – 115, кровоизлияние в ГМ – 5, злокачественные новообразования ГМ – 5.	МРТ и КТ изображения в формате DICOM [58].
BRATS разных версий	Наборы МРТ сканов для сегментации опухоли ГМ.	Более 200 трёхмерных изображений.	Модальности T1, T1c, T2 и FLAIR и соответствующие маски [59].
MICCAI	Набор данных для классификации нормальных и патологических случаев на основе клинической информации.	150 обследований (50 с нормальным состоянием мозга и 100 с инфарктом миокарда после инъекции контрастного вещества).	Наряду с МРТ предоставляются клинические характеристики каждого случая [60].
Figshare	Онлайн-репозиторий с постоянно пополняющимся объемом данных.	Более 800 результатов с данными о ГМ.	Рисунки, наборы данных, медиа, документы, плакаты, код, наборы файлов.
Kaggle	Постоянно пополняющаяся библиотека наборов данных.	Более 36 наборов данных.	У каждого набора присутствуют свои расширения.
The Cancer Imaging Archive (TCIA)	Место хранения радиологических и гистопатологических снимков различных типов рака.	21 Пополняющаяся группа данных.	Разделение групп по заболеваниям, модальности снимков и задачам исследований [61].
TCGA-LGG	Результаты проекта по систематизации данных о генетических мутациях, приводящих к возникновению рака.	500 Образцов каждого типа рака.	Возможность изучения заболевания в динамике [62].
FreeSurfer	Набор программ, общей целью которых является анализ МРТ тканей ГМ и обучающей базой данных.	8 Групп по 20 изображений в каждой.	Инструменты для проведения объёмного и поверхностного анализов, реконструкции моделей [63].

Таблица 3 — Методы машинного обучения, применяемые для анализа и сегментации ГМ

Используемые методы	Набор данных для обучения	Точность, %*	Специфичность, %*	Чувствительность, %*
3D Atrous Residual Network [43]	BRATS 2015, BRATS 2017, BRATS 2018	81,41	–	92
ABC [54]	FreeSurfer, FSL	82,91	–	–
2D CNN [49]	Специально разработанный набор	97	–	100
RCNN [45]	Kaggle 2020	98,21	–	–
CNN [42]	Специально разработанный датасет	87,42	–	–
CNN [55]	Создан из MPT-изображений	–	–	–
CNN + HWF + NSGA [52]	BRATS 2018, BRATS 2019, BRATS 2020	97	–	–
DCNN + HHO + GWO [47]	Kaggle	97	–	–
Diffusion [53]	BRATS 2015	–	–	–
PCA [27]	TCGA-LGG	92,34	–	92,34
FCM + BCET [57]	Создан из MPT-изображений	84,3	–	–
FCM [31]	Создан из MPT-изображений	90,57	72,6	65,6
OPFCM + MF + AKNN [29]	BRATS, MICCAI	99,9	–	–
IBSR [56]	Создан из MPT-изображений	71,48	–	–
ODNN + SMO + DWT + GLCM [41]	BRATS 2017	93	93	98
NLM [55]	Создан из MPT-изображений	–	–	–
DNN + BRISQUE [41]	Создан из MPT-изображений	98,22	99,65	96,12
RNN [44]	Kaggle «Опухоль головного мозга»	97	–	–
ASVM + MRG + GOA+ GLCM [30]	BRATS 2015	95,83	–	91,66
MKSVM + OFFA [37]	–	99,72	99,71	99,72
SVM + Deep Fusion + PCA [50]	BRATS, TCIA	97,89	–	–
SVM + DWT + GLCM [32]	Набор создан в расширении DICOM	96,7	–	–
SVM + Ekbfhv + MGA [48]	BRATS 2018, BRATS 2019	99,7	–	–
SVM + Ekf + GLCM [28]	Создан из MPT-изображений	95,39	95,39	97,04
SVM + GLCM [34]	Kaggle, Figshare	93,05	–	–
SVM + GLCM [36]	Kaggle	93,05	–	98
SVM + GLCM + DWT [38]	Kaggle	98,97	–	98,87
SVM + KMC [33]	Создан из MPT-изображений	99,7	–	–
SVM + OFFA + IGWT [35]	BRATS 2018	99,79	99,92	97,27
Z-net [46]	TCGA-LGG	99,6	–	–

Примечание: * — в таблице указаны средние (по нескольким тестам) значения.

Таблица 4 — Дополнительные метрики эффективности методов

Используемые методы	Дополнительные метрики эффективности
2D CNN [49]	F1-значение – 97%.
CNN [42]	Относительная потеря – 32,25%.
CNN [55]	Время обработки – 30 мин.
CNN, HWF, NSGA [52]	PSNR – 89,4%; SNR – 78,03%; относительная потеря – 36%.
DCNN, HHO, GWO [47]	F-значение – 97%.
Diffusion [53]	Коэффициент ошибки – 15%; ошибка первого рода – 25%; ошибка второго рода – 8%.
PCA [27]	F-значение – 92,34%.
NLM [55]	Уровень селективности – 0,90; прецизионность – 0,89; правильность – 0,88; коэффициент ошибки – 0,10.

Таблица 4 — Дополнительные метрики эффективности методов (продолжение)

Используемые методы	Дополнительные метрики эффективности
DNN, BRISQUE [41]	F-значение – 97,85%.
SVM, Deep Fusion, PCA [50]	F-значение – 87,92%.
SVM, DWT, GLCM [38]	Адекватность отзыва – 95,4%; время обработки – 74,5 с.
SVM, EKbHFV, MGA [48]	F-значение – 99,3%.
Z-net [46]	F-значение – 81%.

По результатам исследования построена фасетная классификация области знаний «Сегментация зон головного мозга». В качестве классификационных признаков верхнего уровня выбраны такие признаки как «Методы сегментации», «Метрики» и «Наборы данных», используемые в рассмотренных методах. По каждому классификационному признаку произведена дальнейшая декомпозиция. Терминальные узлы классификации содержат значения соответствующих классификационных признаков, найденные в результате исследования. Визуализация классификации представлена в виде ментальной карты на Рисунке 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

В начале своего развития в 2014-2015 годах методы машинного обучения имели уровень точности в 74,2% и основывались на методах типа «Diffusion». Однако к настоящему времени данная технология достигла более высокого уровня характеристик точности и информативности диагностики (точность некоторых методов достигает 99,9%, специфичность – 99,92% и чувствительность – до 100%). Причём большая часть современных методов основана на глубоком обучении и свёрточных сетях (точность – выше 97%) или на модификациях метода опорных векторов (точность – 97,3%).

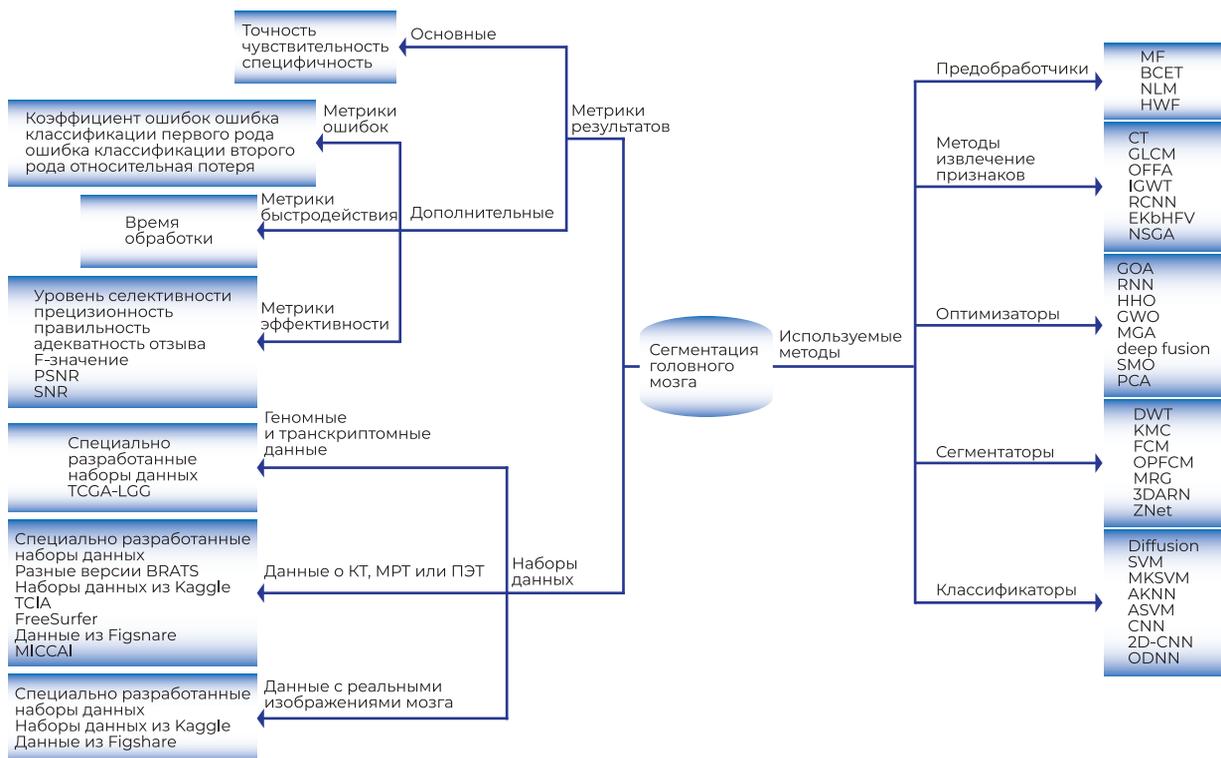


Рисунок 2 — Ментальная схема области знаний «Сегментация зон головного мозга».

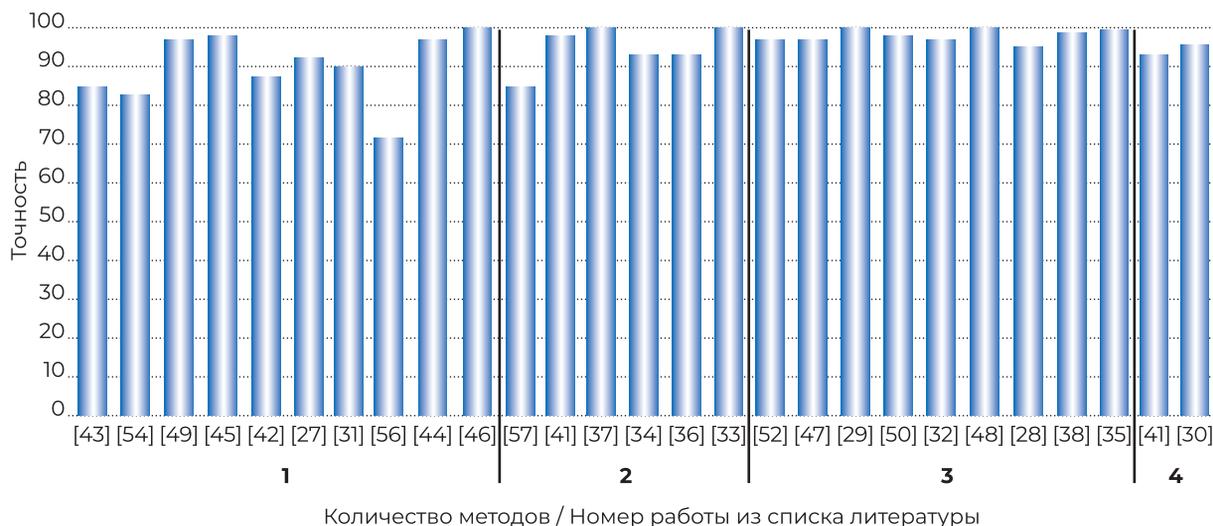


Рисунок 3 — Зависимость точности от количества методов.

Большая часть рассмотренных подходов к сегментации ГМ представляют собой наборы из нескольких методов, применяемых на соответствующих этапах процесса сегментации (этапы предобработки, выделения и сегментирования зон). По мнению авторов, это должно увеличить чувствительность и точность сегментирования изображения. Однако по результатам Таблицы 3 можно сделать вывод, что точность работы алгоритмов зависит не столько от методов, используемых при обработке, сколько от их правильного взаимодействия. График зависимости точности от количества используемых в рассмотренных решениях методов, построенный по данным Таблицы 3, показан на Рисунке 3.

Выводы

Разработка методов сегментации ГМ началась ещё с начала двухтысячных годов на основе машинного обучения, и новые методы продолжают появляться до сих пор. Однако по мере развития технологий разрабатываются и внедряются в практику методы глубокого обучения, позволяющие занимать меньше дискового пространства и работать с незаложенными изначально ситуациями, ценой возросших требований к мощности.

Целью всех рассмотренных исследований является повышение точности при сегментировании зон ГМ и нахождении аномальных образований. Достигнутый к настоящему времени высокий уровень характеристик информативности

диагностических методов позволяет использовать их при решении реальных задач нахождения и лечения острых нарушений мозгового кровообращения, объёмных новообразований, травматических повреждений ГМ и т. д., что показано в [65, 66]. В рамках дальнейших исследований планируется определить практическую значимость каждого метода для задач сегментации изображений ГМ и области их применения.

Для случаев, когда любое промедление может привести к летальному исходу (острейший период инсульта, опасные для жизни черепно-мозговые травмы и др.), немаловажной метрикой эффективности метода является скорость [5, 67], определяемая временем обработки данных. Вместе с тем, данная характеристика используется для оценки качества методов в малом количестве исследований, а в большинстве случаев вообще не рассматривается. При этом скорость обработки сигнала для некоторых методов в зависимости от использованного принципа работы измеряется минутами [27, 32], что в ряде случаев может стоить больному жизни. Для решения данной проблемы требуется модификация и/или разработка новых методов, применимых в режиме реального времени для сегментации и анализа структур ГМ.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Источники финансирования. Источники финансирования отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Васильева Е.Б., Талыпов А.Э., Петриков С.С. Особенности клинического течения черепно-мозговой травмы при различных видах повреждения головного мозга // НМП. – 2019. – №3. – С.295-301. [Vasil'eva EB, Talypov AE, Petrikov SS. Osobennosti klinicheskogo techeniya cherepno-mozgovoј travmy pri razlichnyh vidah povrezhdeniya golovnogogo mozga. NMP. 2019; 3: 295-301. (In Russ.)] doi: 10.23934/2223-9022-2019-8-3-295-301.
2. Сергеев В.А., Сергеева П.В., Патракова А.А. Клинико-психологический анализ эмоционально-личностных расстройств у больных с отдалёнными последствиями черепно-мозговых травм, осложнённых и неосложнённых алкоголизмом // Научные результаты биомедицинских исследований. – 2020. – №3. – С.417-433. [Sergeev VA, Sergeeva PV, Patrakova AA. Kliniko-psihologicheskij analiz emocional'nolichnostnyh rasstrojstv u bol'nyh s otdal'yonnymi posledstviyami cherepno-mozgovykh travm, oslozhnyonnyh i neoslozhnyonnyh alkogolizmom. Nauchnye rezul'taty biomedicinskih issledovanij. 2020; 3: 417-433. (In Russ.)] doi: 10.18413/2658-6533-2020-6-3-0-11.
3. Лихтерман Л.Б., Кравчук А.Д., Филатова М.М. Сотрясение головного мозга: тактика лечения и исходы // Анналы клинической и экспериментальной неврологии – 2008. – №1. – С.1-10. [Lihtermann LB, Kravchuk AD, Filatova MM. Sotryasenie golovnogogo mozga: taktika lecheniya i iskhody. Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii. 2008; 1: 1-10. (In Russ.)]
4. Трашков А.П., Спиринов А.Л., Цыган Н.В., Артеменко М.Р. и др. Глиальные опухоли головного мозга: общие принципы диагностики и лечения // Педиатр. – 2015. – №4. – С.75-84. [Trashkov AP, Spirin AL, Cygan NV, Artemenko MR, et al. Glial'nye opuholi golovnogogo mozga: obshchie principy diagnostiki i lecheniya. Pediatr. 2015; 4: 75-84. (In Russ.)] doi: 10.171816/PED6475-84.
5. Плахова В.В., Кручинина Е.А. Вопросы диагностики и лечения злокачественных новообразований // FORCIPE. – 2019. – №1. – С.564-564. [Plahova VV, Kruchinina EA. Voprosy diagnostiki i lecheniya zlokachestvennykh novoobrazovanij. FORCIPE. 2019; 1: 564-564. (In Russ.)]
6. Щербук А.Ю., Ерошенко М.Е., Щербук Ю.А. Современные методы картирования функционально значимых зон головного мозга в хирургии опухолей центральных извилин // Вестн. хир. – 2017. – №4. – С.104-109. [Shcherbuk AYU, Eroshenko ME, Shcherbuk YUA. Sovremennyye metody kartirovaniya funktsional'no znachimykh zon golovnogogo mozga v hirurgii opuholej central'nykh izvilin. Vestn. hir. 2017; 4: 104-109. (In Russ.)]
7. Кремнева Е.И., Коновалов Р. Н., Кротенкова М. В. Функциональная магнитно-резонансная томография // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. – 2011. – №5(1). – С.30-34. [Kremneva EI, Konovalov RN, Krotenkova MV. Funktsional'naya magnitno-rezonansnaya tomografiya. Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii. 2011; 5(1): 30-34. (In Russ.)]
8. Куликова С.Н., Брюхов В.В., Переседова А.В., Кротенкова М.В., Завалишин И.А. Диффузионная тензорная магнитно-резонансная томография и трактография при рассеянном склерозе: обзор литературы // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. – 2012. – №112(2-2). – С.52-59. [Kulikova SN, Bryuhov VV, Peresedova AV, Krotenkova MV, Zavalishin IA. Diffuzionnaya tenzornaya magnitno-rezonansnaya tomografiya i traktografiya pri rasseyanom skleroze: obzor literatury. Zhurnal nevrologii i psihiatrii im. S.S. Korsakova. Specvypuski. 2012; 112(2-2): 52-59. (In Russ.)]
9. Кротенкова М.В., Суслин А.С., Танашян М.М., Коновалов Р.Н., Брюхов В.В. Диффузионно-взвешенная МРТ и МРТ-перфузия в остром периоде ишемического инсульта // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. – 2009. – №3(4). – С.11-16. [Krotenkova MV, Sushlin AS, Tanashyan MM, Konovalov RN, Bryuhov VV. Diffuzionno-vzveshennaya MRT i MRT-perfuziya v ostrom periode ishemicheskogo insul'ta. Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii. 2009; 3(4): 11-16. (In Russ.)]
10. Шестакова А.Н., Буторина А.В., Осадчий А.Е., Штыров Ю.Ю. Магнитоэнцефалография – новейший метод функционального картирования мозга человека // Экспериментальная психология. – 2012. – №5(2). – С.119-134. [SHestakova AN, Butorina AV, Osadchij AE, SHtyrov YUYU. Magnitoencefalografiya – novejšij metod funktsional'nogo kartirovaniya mozga cheloveka. Eksperimental'naya psihologiya. 2012; 5(2): 119-134. (In Russ.)]
11. Гуляев С.А. Электроэнцефалография и исследования функциональной активности головного мозга // Русский журнал детской неврологии. – 2021. – №16(4). – С.59-68. [Gulyaev SA. Elektro-

- encefalografiya i issledovaniya funktsional'noj aktivnosti golovnogogo mozga. *Russkij zhurnal detskoj nevrologii*. 2021; 16(4): 59-68. (In Russ.)]
12. Дюкарев В.В. Позитронно-эмиссионная томография: сущность метода, достоинства и недостатки // *БМИК*. – 2013. – №3(11). – С.1196. [Dyukarev VV. Pozitronno-emissionnaya tomografiya: sushchnost' metoda, dostoinstva i nedostatki. *BMIK*. 2013; 3(11): 1196. (In Russ.)]
 13. Санковец Д.Н., Гнедько Т.В., Свирская О.Я. Близкая к инфракрасной спектроскопия (NIRS) – новая краска в палитре неонатолога // *Неонатология: Новости. Мнения. Обучение*. – 2017. – №1(15). – С.58-71. [Sankovets DN, Gned'ko TV, Svirskaya OYA. Blizkaya k infrakrasnoj spektroskopii (NIRS) – novaya kraska v palitre neonatologa. *Neonatologiya: Novosti. Mneniya. Obuchenie*. 2017; 1(15): 58-71. (In Russ.)]
 14. Давыдовский И.В. Врачебные ошибки // *Сов. мед.* – 1941. – №3. – С.3-10. [Davydovskij IV. Vrachebnyye oshibki. *Sov. med*. 1941; 3: 3-10. (In Russ.)]
 15. Султанов И.Я. О некоторых так называемых объективных причинах диагностических ошибок в практической деятельности врачей // *Вестник РУДН. Серия: Медицина*. – 2002. – №2. – С.34-38. [Sultanov IYA. O nekotoryh tak nazyvaemykh ob'ektivnykh prichinah diagnosticheskikh oshibok v prakticheskoy deyatelnosti vrachej. *Vestnik RUDN. Seriya: Medicina*. 2002; 2: 34-38. (In Russ.)]
 16. Сигаева Д.В., Логинов М.С. Влияние качества исходного набора данных для машинного обучения на точность диагноза // *Scientist*. – 2022. – №4(22). – С.130-132. [Sigaeva DV, Loginov MS. Vliyaniye kachestva iskhodnogo nabora dannyh dlya mashinnogo obucheniya na tochnost' diagnoza. *Scientist*. 2022; 4(22): 130-132. (In Russ.)]
 17. Махамбетчин М.М. К дискуссии о врачебных ошибках // *Клиническая медицина*. – 2021. – №2. – С.150-152. [Mahambetchin MM. K diskussii o vrachebnykh oshibkakh. *Klinicheskaya medicina*. 2021; 2: 150-152. (In Russ.)]
 18. Андропова П.Л., Гаврилов П.В., Колесникова П.А. и др. Диагностическая эффективность отдельных систем автоматического анализа КТ-изображений в выявлении ишемического инсульта в бассейне средней мозговой артерии // *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. – 2023. – №3. – С.194-200. [Andropova PL, Gavrilov PV, Kolesnikova PA, et al. Diagnosticheskaya effektivnost' otdel'nykh sistem avtomaticheskogo analiza KT-izobrazhenij v vyavlenii ishemicheskogo insulta v bassejne srednej mozgovoj arterii. *Sibirskij zhurnal klinicheskoy i eksperimental'noj mediciny*. 2023; 3: 194-200. (In Russ.)] doi: 10.29001/2073-8552-2023-39-3-194-200.
 19. Jin L, Min L, Jianxin W, et al. A Survey of MRI-Based Brain Tumor Segmentation Methods. 2014; 19(6): 578-595. doi: 10.1109/TST.2014.6961028.
 20. Абдулракеб АРА, Сушкова ЛТ, Лозовская НА. Обзор методов сегментации опухолей на МРТ-изображениях головного мозга // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2015. – №1(29). – С.122-138. [Abdulrakeb ARA, Sushkova LT, Lozovskaya NA. Obzor metodov segmentacii opuholej na MRT-izobrazheniyah golovnogogo mozga. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*. 2015; 1(29): 122-138. (In Russ.)]
 21. Ahlam AH, Sarmad HM, Ban SI. Segmentation and Isolation of Brain Tumors Using Different Images Segmentation Methods. 2024; 21(8): 1-8. doi: 10.21123/bsj.2024.7640.
 22. Kai P, Sairam V, Ludwik K. Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update, *Information and Software Technology*. 2015; 64: 1-18. doi: 10.1016/j.infsof.2015.03.007.
 23. Vanhala E, Kasurinen J, Knutas A, Herala A. The Application Domains of Systematic Mapping Studies: A Mapping Study of the First Decade of Practice With the Method. 2022; 10: 37924-37937. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165079.
 24. Алексева М.Г., Зубов А.И., Новиков М.Ю. Искусственный интеллект в медицине // *МНИЖ*. – 2022. – №7-2(121). – С.10-13. [Alekseeva MG, Zubov AI, Novikov MYU. Iskusstvennyj intellekt v medicine. *Mnizh*. 2022; №7-2(121): 10-13. (In Russ.)] doi: 10.23670/IRJ.2022.121.7.038.
 25. Иванова В.Н., Латкин А.П., Фершт В.М. Современные подходы к использованию искусственного интеллекта в медицине // *Территория новых возможностей*. – 2020. – №1. – С.121-130. [Ivanova VN, Latkin AP, Fersht VM. Sovremennyye podhody k ispol'zovaniyu iskusstvennogo intellekta v medicine. *Territoriya novykh vozmozhnostej*. 2020; 1: 121-130. (In Russ.)]. doi: 10.24866/VVSU/2073-3984/2020-1/121-130.

26. Гусев А. Обзор Российских систем искусственного интеллекта для здравоохранения [Электронный ресурс] Webiomed. Доступно по: <https://webiomed.ru/blog/obzor-rossiiskikh-sistem-iskusstvennogo-intellekta-dlia-zdravookhraneniia>. Ссылка активна на 20.07.2024. [Gusev A. Obzor Rossijskih sistem iskusstvennogo intellekta dlya zdravookhraniya. Available at: <https://webiomed.ru/blog/obzor-rossiiskikh-sistem-iskusstvennogo-intellekta-dlia-zdravookhraneniia>. Accessed 20.07.2024. (In Russ.)]
27. Bruce F, David HS, Evelina B, et al. Whole Brain Segmentation: Automated Labeling of Neuroanatomical Structures in the Human Brain. 2002; 33: 341-355. doi: 10.1016/S0896-6273(02)00569.
28. Chen B, Zhang L, Chen H, Liang K, Chen X. A novel extended Kalman filter with support vector machine-based method for the automatic diagnosis and segmentation of brain tumors. 2021; 200: 105797.
29. Kumar DM, Satyanarayana D, Prasad MG. MRI brain tumor detection using optimal possibilistic fuzzy C-means clustering algorithm and adaptive k-nearest neighbor classifier. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021; 12(2): 2867-2880. doi: 10.1007/s12652-020-02444-7.
30. Srinivasa RA, Chenna RP. MRI brain tumor segmentation and prediction using modified region growing and adaptive SVM. 2021; 25: 4135-4148. doi: 10.1007/s00500-020-05493-4.
31. Sheela C, Suganthi G. Accurate MRI brain tumor segmentation based on rotating triangular section with fuzzy C-means optimisation. Sādhanā. 2021; 46(4). doi: 10.1007/s12046-021-01744-8.
32. Gokulalakshmi A, Karthik S, Karthikeyan N, Kavitha MS. ICM-BTD: improved classification model for brain tumor diagnosis using discrete wavelet transform-based feature extraction and SVM classifier. 2020; 24: 18599-18609. doi: 10.1007/s00500-020-05096-z.
33. Sharath CP, Soundarya J, Priyadharsini R. Brain tumor detection and classification using K-means clustering and SVM classifier. 2018; 49-63. doi: 10.1007/978-981-13-8323-6_5.
34. Hussain A, Khunteta A. Semantic segmentation of brain tumor from MRI images and SVM classification using GLCM features. 2020; 38-43. doi: 10.1109/ICIRCA48905.2020.9183385.
35. Kumar DM, Satyanarayana D, Prasad MG. An improved Gabor wavelet transform and rough K-means clustering algorithm for MRI brain tumor image segmentation. 2021; 80(1): 6939-6957. doi: 10.1007/s11042-020-09635-6.
36. Shahajad M, Gambhir D, Gandhi R. Features extraction for classification of brain tumor MRI images using support vector machine. 2021; 767-772. doi: 10.1109/Confluence51648.2021.9377111.
37. Krishnakumar S, Manivannan K. Effective segmentation and classification of brain tumor using rough K means algorithm and multi-kernel SVM in MR images. 2021; 12: 6751-6760. doi: 10.1007/s12652-020-02300-8.
38. Mehrotra R, Ansari MA, Agrawal R. A Novel Scheme for Detection & Feature Extraction of Brain Tumor by Magnetic Resonance Modality Using DWT & SVM. 2020; 225-230. doi: 10.1109/IC3A48958.2020.233302.
39. Sarkar A, Maniruzzaman M, Ahsan MS, et al. Identification and classification of brain tumor from MRI with feature extraction by support vector machine. 2020; 1-4. doi: 10.1109/INCET49848.2020.9154157.
40. Anaya-Isaza A, Mera-Jiménez L. Data augmentation and transfer learning for brain tumor detection in magnetic resonance imaging. 2022; 10(4): 23217-23233. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3154061.
41. Musallam AS, Sherif AS, Hussein MK. A new convolutional neural network architecture for automatic detection of brain tumors in magnetic resonance imaging images. 2022; 10(99): 2775-2782. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140289.
42. More SS, Mange MA, Sankhe MS, Sahu SS. Convolutional Neural Networkbased Brain Tumor Detection. 2021; 1532-1538. doi: 10.1063/5.0217286.
43. Le N, Yamazaki K, Quach KG, Truong D, Savvides M. A multi-task contextual atrous residual network for brain tumor detection & segmentation. In 2020 25th International Conference on Pattern Recognition. 2021; 5943-5950. doi: 10.1109/ICPR48806.2021.9412414.
44. Ma L, Zhang F. End-to-end predictive intelligence diagnosis in brain tumor using lightweight neural network. 2021; 111: 107666. doi: 10.1016/j.asoc.2021.107666.
45. Kesav N, Jibukumar MG. Efficient and low complex architecture for detection and classification of Brain Tumor using RCNN with Two Channel CNN. 2022; 34(8): 6229-6242. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.008.

46. Ottom MA, Rahman HA, Dinov ID. Znet: deep learning approach for 2D MRI brain tumor segmentation. 2022; 10: 1-8. doi: 10.1109/JTEHM.2022.3176737.
47. Qader SM, Hassan BA, Rashid TA. An improved deep convolutional neural network by using hybrid optimisation algorithms to detect and classify brain tumor using augmented MRI images. – 2022; 1-28. doi: 10.21203/rs.3.rs-1746725/v1.
48. Sharif MI, Khan MA, Alhusein M, Aurangzeb K, Raza M. A decision support system for multimodal brain tumor classification using deep learning. *Complex & Intelligent Systems*. 2021; 8(1): 1-14. doi: 10.1007/s40747-021-00321-0.
49. Chanu MM, Thongam K. Computer-aided detection of brain tumor from magnetic resonance images using deep learning network. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021; 12: 6911-6922. doi: 10.1007/s12652-020-02336-w.
50. Sethy PK, Behera SK. A data-constrained approach for brain tumor detection using fused deep features and SVM. 2021; 80(4): 28745-28760. doi: 10.1007/s11042-021-11098-2.
51. Preethi S, Aishwarya P. An efficient wavelet-based image fusion for brain tumor detection and segmentation over PET and MRI image. 2021; 80(1): 14789-14806. doi: 10.1007/s11042-021-10538-3.
52. Sharif MI, Li JP, Amin J, Sharif A. An improved framework for brain tumor analysis using MRI based on YOLOv2 and convolutional neural network. 2021; 7: 2023-2036. doi: 10.1007/s40747-021-00310-3.
53. Дмитриев Г.А., Кирсанова А.В., Альбахели В.А.А. Автоматическое выделение области острого ишемического инсульта на МРТ-изображениях // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – №4(28). – С.166-174. [Dmitriev GA, Kirsanova AV, Al'baheli VAA. Avtomaticheskoe vydelenie oblasti ostrogo ishemicheskogo insul'ta na MRT-izobrazheniyah. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*. 2014; 4(28): 166-174. (In Russ.)]
54. Магонов Е.П., Прахова Л.Н., Ильвес А.Г., Катаева Г.В., Трофимова Т.Н. Автоматическая сегментация МРТ-изображений головного мозга: методы и программное обеспечение. – Санкт-Петербург: Коллектив авторов, 2014. – С.1-5. [Magonov EP, Prahova LN, Il'ves AG, Kataeva GV, Trofimova TN. Avtomaticheskaya segmentaciya MRT-izobrazhenij golovnogo mozga: metody i programmnnoe obespechenie. *Sankt-Peterburg: Kollektiv avtorov*. 2014: 1-5. (In Russ.)]
55. Анджали Х.Т., Анандрао Б.К. Сегментация опухоли головного мозга на магнитно-резонансной томографии с использованием нечеткого деформируемого слияния и алгоритма Dolphin-SCA // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т.23. – №4. – С.1-10. [Andzhali HT, Anandrao BK. Segmentaciya opuholi golovnogo mozga na magnitno-rezonansnoj tomografii s ispol'zovaniem nechetkogo deformiruемого sliyanija i algoritma Dolphin-SCA. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2023; 23(4): 1-10. (In Russ.)] doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-776-785.
56. Зубов А.Ю., Сеньюкова О.В. Сегментация изображений магнитно-резонансной томографии головного мозга с помощью сопоставления с несколькими атласами. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015. – С.1-6. [Zubov AYU, Senyukova OV. Segmentaciya izobrazhenij magnitno-rezonansnoj tomografii golovnogo mozga s pomoshch'yu sopostavleniya s neskol'kimi atlasami. М.: MGU imeni M.V. Lomonosova. 2015: 1-6. (In Russ.)]
57. Зотин А.Г., Кириллова С.В., Курако М.А., Хамад Ю.А., Симонов К.В. Обнаружение опухоли мозга на основе МРТ с применением метода нечеткой кластеризации с-средних. Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева. – 2019. – С.1-11. [Zotin AG, Kirillova SV, Kurako MA, Hamad YUA, Simonov KV. Obnaruzhenie opuholi mozga na osnove mrt s primeneniem metoda nechetkoj klasterizacii s-srednih. *Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii im. akademika M.F. Reshetneva*. 2019: 1-11. (In Russ.)]
58. Технологии искусственного интеллекта в здравоохранении [Электронный ресурс] МОСМЕД. Доступно по: <https://mosmed.ai>. Ссылка активна на 07.08.2024. [Tekhnologii iskusstvennogo intellekta v zdravoohranenii. Available at: <https://mosmed.ai>. Accessed 07.08.2024. (In Russ.)]
59. Hongwei BL, Gian MC, Syed MA, et al. The Brain Tumor Segmentation (BraTS) Challenge 2023: Brain MR Image Synthesis for Tumor Segmentation (BraSyn). *PapersWithCode*. 2023; 1-6.
60. Lalande A, Chen Z, Decourselle T, et al. Emidec: A Database Usable for the Automatic Evaluation of Myocardial Infarction from Delayed-Enhancement Cardiac MRI. 2020; 5-89.

61. Kenneth C, Bruce V, Kirk S, et al. The Cancer Imaging Archive: Maintaining and Operating a Public Information Repository. 2013; 26(6). doi: 1045-1057.10.1007/s10278-013-9622-7.
62. Eduarda PM, Roberta C, Celine SG, Monica LM. Updating TCGA glioma classification through integration of molecular profiling data following the 2016 and 2021 WHO guidelines. 2023; 11. doi: 10.1101/2023.02.19.529134.
63. Kennedy KM, Raz N. Social Cognitive Neuroscience, Cognitive Neuroscience, Clinical Brain Mapping. 2015; 58(1): 259-289. doi: 10.1146/annurev.psych.58.110405.085654.
64. Румянцев П.О., Саенко В.А., Румянцева У.В., Чекин С.Ю. Статистические методы анализа в клинической практике. Медицинский радиологический научный центр РАМН. – С. 1-44. [Rumyantsev PO, Saenko VA, Rumyantseva UV, Chekin SYU. Statisticheskie metody analiza v klinicheskoy praktike. Medicinskij radiologicheskij nauchnyj centr RAMN. P.1-44. (In Russ.)]
65. Андропова П.Л., Гаврилов П.В., Савинцева Ж.И., Вовк А.В., Рыбин Е.В. Применение систем искусственного интеллекта в нейрорадиологии острого ишемического инсульта // Лучевая диагностика и терапия. – 2021. – №2(12). – С.30-35. [Andropova PL, Gavrilov PV, Savinceva ZHI, Vovk AV, Rybin EV. Primenenie sistem iskusstvennogo intellekta v nejroradiologii ostrogo ishemicheskogo insul'ta. Luchevaya diagnostika i terapiya. 2021; 2(12): 30-35. (In Russ.)] doi: 10.22328/2079-5343-2021-12-2-30-36.
66. Толмачев И.В., Стариков Ю.В., Старикова Е.Г. и др. Искусственный интеллект в онкологии: области применения, перспективы и ограничения // Вопросы онкологии – 2022. – №6(68). – С.691-699. [Tolmachev IV, Starikov YUV, Starikova EG, et al. Iskusstvennyj intellekt v onkologii: oblasti primeneniya, perspektivy i ogranicheniya. Voprosy onkologii. 2022; 6(68): 691-699. (In Russ.)] doi: 10.37469/0507-3758-2022-68-6-691-699.
67. Сидякина И.В., Шаповаленко Т.В., Лядов К.В. Механизмы нейропластичности и реабилитация в острейшем периоде инсульта // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. – 2013. – №7(1). – С.52-56. [Sidyakina IV, Shapovalenko TV, Lyadov KV. Mekhanizmy nejroplastichnosti i reabilitaciya v ostrejshem periode insul'ta. Annaly klinicheskoy i eksperimental'noj nevrologii. 2013; 7(1): 52-56. (In Russ.)]

ВАСИЛЬЕВ Ю.А.,

к.м.н., ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия; ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, г. Москва, Россия, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

ПАМОВА А.П.,

к.м.н., ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия, e-mail: PamovaAP@zdrav.mos.ru

АРЗАМАСОВ К.М.,

к.м.н., ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия; МИРЭА, г. Москва, Россия, e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

ВЛАДИМИРСКИЙ А.В.,

д.м.н., ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия; ПМГМУ им. И.М. Сеченова, г. Москва, Россия, e-mail: VladimirskijAV@zdrav.mos.ru

ЗАЮНЧКОВСКИЙ С.Ю.,

ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия, e-mail: ZayunchkovskijSY@zdrav.mos.ru

ЗИНЧЕНКО В.В.,

ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия, e-mail: ZinchenkoV1@zdrav.mos.ru

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТРИК ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБЛАСТИ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_58

Аннотация. Цель: настоящее исследование направлено на разработку клинической классификации программного обеспечения (ПО) на основе искусственного интеллекта (ИИ) в области лучевой диагностики.

Материалы и методы: для проведения исследования был проведён всесторонний анализ доступной информации о ПО на основе ИИ в сфере лучевой диагностики с использованием отечественных и зарубежных баз данных. В процессе анализа были выявлены ключевые аспекты, включая клиническую применимость ПО на основе ИИ, диагностическую точность медицинских изделий с использованием ИИ в лучевой диагностике.

Результаты: была разработана клиническая классификация ПО на основе ИИ в области лучевой диагностики. Кроме того, было выявлено важное замечание относительно представления метрик диагностической точности ПО на основе ИИ. В результате этого предложенная классификация была расширена и дополнена определением уровня представления метрик диагностической точности в зависимости от клинической классификации.

Заключение: на основе проведенного исследования разработана клиническая классификация ПО на основе ИИ, что обеспечивает единый подход к представлению данных о диагностической точности со стороны разработчиков. Данный подход позволяет повысить прозрачность и сравнимость информации о различных ПО на основе

ИИ в медицинской практике, что способствует повышению эффективности и безопасности использования ПО на основе ИИ в медицинской практике. Результаты настоящего исследования имеют потенциал для масштабирования на другие области применения ИИ и могут быть использованы для совершенствования системы регулирования качества медицинских изделий с применением ИИ.

Ключевые слова: информационные технологии, искусственный интеллект, классификация, лучевая-диагностика, технические характеристики, диагностическая точность.

Для цитирования: Васильев Ю.А., Памова А.П., Арзамасов К.М., Владимирский А.В., Заюнчковский С.Ю., Зинченко В.В. Представление метрик диагностической точности в зависимости от классификации программного обеспечения на основе искусственного интеллекта в области лучевой диагностики. Врач и информационные технологии. 2025; 1: 58-69. doi: 10.25881/18110193_2025_1_58.

VASILEV YU.A.,

PhD, Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia; Pirogov National Medical and Surgical Center, Moscow, Russia, e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

PAMOVA A.P.,

PhD, Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia, e-mail: PamovaAP@zdrav.mos.ru

ARZAMASOV K.M.,

PhD, Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia; MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

VLADZYMYRSKIY A.V.,

DSc, Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia; I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russia, e-mail: VladzimirskijAV@zdrav.mos.ru, ORCID ID: 0000-0002-2990-7736

ZAYUNCHKOVSKIY S.YU.,

Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia, e-mail: ZayunchkovskijSY@zdrav.mos.ru

ZINCHENKO V.V.,

Moscow Center for Diagnostics & Telemedicine, Moscow, Russia, e-mail: ZinchenkoVV1@zdrav.mos.ru

PRESENTATION OF DIAGNOSTIC ACCURACY METRICS BASED ON CLASSIFICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SOFTWARE IN RADIOLOGY

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_58

Abstract. *The implementation of artificial intelligence in healthcare is a key direction for technology development in Russia, aimed at improving the quality of medical services and increasing diagnostic accuracy. However, the lack of standards for presenting metrics of diagnostic accuracy of artificial intelligence-based software (AI-based software) complicates comparative analysis and selection of the most suitable software for medical organizations. Therefore, developing a detailed classification of AI-based software is an important task for ensuring safety and quality of medical care, as well as determining the interchangeability of AI-based medical devices.*

Purpose: This study aims to develop a clinical classification of AI-based software in radiology.

Materials and Methods: To conduct the study, a comprehensive analysis of available information on AI-based software in radiology was conducted using domestic and foreign databases. In the process of analysis, key aspects were identified, including clinical applicability of AI-based software, diagnostic accuracy of medical devices using AI in radiology.

Results: a clinical classification of AI-based software in the field of radiology was developed. In addition, an important observation regarding the representation of diagnostic accuracy metrics of AI-based software was identified. As a result, the proposed classification was extended and supplemented by defining the level of representation of diagnostic accuracy metrics depending on the clinical classification.

Conclusion: based on the conducted research, a clinical classification of AI-based software has been developed, which provides a unified approach to the presentation of data on diagnostic accuracy by developers. This approach improves the

transparency and comparability of information about different AI-based software in medical practice, thereby improving the efficiency and safety of AI-based software use in medical practice. The results of this study have the potential to be scaled to other AI applications and can be used to improve the quality regulation system for AI-enabled medical devices.

Keywords: *information technology, artificial intelligence, classification, radiology, technical specifications, diagnostic accuracy.*

For citation: *Vasilev Yu.A., Pamova A.P., Arzamasov K.M., Vladzimirskyy A.V., Zayunchkovskiy S.Yu., Zinchenko V.V. Presentation of diagnostic accuracy metrics based on classification of artificial intelligence software in radiology. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 58-69. doi: 10.25881/18110193_2025_1_58.*

ВВЕДЕНИЕ

Согласно указу Президента от 10.10.2019 № 490 внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в сферу здравоохранения стало одним из ключевых направлений развития подобных технологий в Российской Федерации (РФ). Это связано со стремлением улучшить качество медицинских услуг, повысить точность диагностики и оптимизировать процессы лечения. Разработкой программного обеспечения (ПО) на основе ИИ занимаются организации, специализирующиеся на создании цифровых продуктов для медицинской сферы.

Внедрение технологий ИИ в здравоохранение происходит после успешного прохождения технических, клинических испытаний и дальнейшей государственной регистрации ПО на основе ИИ как медицинского изделия [1], либо в составе другого медицинского изделия. Во время клинических испытаний основное внимание уделяется анализу метрик диагностической точности ПО на основе ИИ, которые заявляются в регуляторные органы со стороны разработчика.

Настоящая публикация – это обобщение полученного опыта в процессах подготовки к обращению и собственно обращения медицинских изделий на основе ПО с ИИ в части корректности оценки технических характеристик таких изделий и представления результатов их измерений.

В сфере здравоохранения наиболее широкое применение технологий ИИ наблюдается в лучевой диагностике (ПНСТ 873-2023 «Системы искусственного интеллекта в лучевой диагностике. Основные положения»), а среди ключевых метрик диагностической точности ПО на основе ИИ (под которыми в данной публикации имеются в виду метрики, указанные ниже, относящиеся к **техническим характеристикам** ПО), активно применяющихся в радиологической практике, выделяются: чувствительность (от англ. «sensitivity»); специфичность (от англ. «specificity»); точность (диагностическая, от англ. «accuracy»); площадь под характеристической кривой (ROC-AUC от англ. «area under receiver operating characteristic curve»); индекс Дайса-Соренсена («Sørensen–Dice index»).

При оценке основных технических характеристик не обойтись без понятия «точность измерений», принятого в метрологии. «Точность измерений», «точность результата измерения»

– это близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины. Любая измеренная техническая характеристика отражает истинное значение измеряемой величины лишь с определенной погрешностью. Следовательно, возникает вопрос о представлении результатов измерений и их округлении до приемлемых значений. В контексте здравоохранения для ПО на основе ИИ это необходимо для следующих целей:

1. Обеспечения безопасности и качества медицинской помощи;
2. Обоснования клинической значимости применяемых технологий ИИ;
3. Для правильного расчета конечного результата, поставленного в той или иной задаче;
4. Для удобства представления результатов измерений (испытаний) потребителю и другим заинтересованным сторонам;
5. Для соблюдения требований стандартов (в частности ГОСТ Р 8.736-2011) и других нормативных документов;
6. Для единообразия форм оформления документации (технической, эксплуатационной и в целом – конструкторской), а также протоколов испытаний;
7. Для совершенствования и развития методов измерений и повышения компетентности персонала.

Необходимо отметить, что в соответствии со ст. 38 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» в Государственный реестр медицинских изделий и организаций, осуществляющих производство и изготовление медицинских изделий, должны вноситься сведения о взаимозаменяемых медицинских изделиях. Критериям взаимозаменяемости медицинских изделий уделяется особое внимание контролирующими и надзорными органами. Взаимозаменяемость медицинских изделий в соответствии с указанной статьей Федерального закона определяется следующим образом: медицинские изделия признаются взаимозаменяемыми, если они «сравнимы по функциональному назначению, качественным и **техническим характеристикам** и способны заменить друг друга». Приведенные выше метрики являются одними из основных технических характеристик для ПО на основе ИИ. Таким образом, вынесение решения о взаимозаменяемости ПО на основе

ИИ, являющихся самостоятельными медицинскими изделиями, невозможно без анализа этих существенных технических характеристик. Ниже в публикации будет показана значимость корректности определения метрик (технических характеристик) диагностической точности ПО на основе ИИ в клинической практике для вынесения решения о взаимозаменяемости.

В свете активно развивающейся стандартизации искусственного интеллекта в здравоохранении сформировались вопросы, которые требуют внимания как со стороны разработчиков, так и со стороны медицинского сообщества [2]. На данный момент отсутствуют стандарты представления дробной части метрик диагностической точности, которые должны быть указаны разработчиками при регистрации ПО на основе ИИ. Существующий подход, при котором каждый разработчик самостоятельно определяет с каким уровнем точности он предоставит данные регуляторным органам, может способствовать допуску к использованию в здравоохранении ПО на основе ИИ низкого качества, что представляет потенциальную угрозу здоровью пациентов. Кроме этого, данный подход препятствует сравнительному анализу ПО на основе ИИ с идентичными функциями, что усложняет процесс выбора наиболее подходящего ПО для медицинской организации.

Таким образом, акцент в данной публикации делается на разработку детализированной классификации ПО с технологиями ИИ. Эта классификация призвана служить инструментом для определения уровня представления метрик диагностической точности, который должен учитываться разработчиками в конструкторской документации на стадиях проектирования и разработки, а также указан при представлении информации в регуляторные органы здравоохранения и для конечных пользователей цифрового продукта – медицинских работников [3].

Цель данной работы заключается в создании классификации ПО на основе ИИ в области лучевой диагностики, основанной на клинической применимости и диагностической точности подобных медицинских изделий. Этот подход предполагает комплексный анализ и систематизацию критериев, определяющих эффективность и надежность ПО на основе ИИ в контексте лучевых исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная публикация подготовлена авторским коллективом в рамках научно-исследовательской работы «Научно-методические основы цифровой трансформации службы лучевой диагностики», (№ ЕГИСУ: № 123031400118-0) в соответствии с Приказом от 22.12.2023 г. № 1258 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2024 год и плановый период 2025 и 2026 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

Были проанализированы материалы, связанные с процедурами подготовки к регистрации ПО на основе ИИ (например, заявления о государственной регистрации, если они опубликованы разработчиком ПО), применяемого в области лучевой диагностики. Дополнительно были проанализированы публикации, в которых некоторые разработчики указывали метрики диагностической точности своих изделий, а также публикации, которые содержали какую-либо классификацию ПО на основе ИИ (в период с 15.05.2024 по 30.05.2024). Для ПО, зарегистрированного на территории РФ, был использован официальный ресурс Росздравнадзора, раздел «Медицинские изделия», подраздел «Регистрация медицинских изделий», «Государственная регистрация медицинских изделий». Для анализа ПО на основе ИИ, зарегистрированного за пределами РФ, был выбран веб-сайт Food and Drug Administration (FDA) Соединенных Штатов Америки. Исследование проводилось в рамках раздела «Medical Devices», подраздела «Digital Health Center of Excellence», категории «Software as a Medical Device (SaMD)», и последующего подраздела «Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML)-Enabled Medical Devices». Основное внимание было уделено ПО на основе ИИ в лучевой диагностике. Информация на сайте FDA охватывает продукты из разных стран, что позволяет избежать географического смещения выборки и обеспечивает объективность анализа.

Для расширения спектра исследуемого ПО на основе ИИ за последние 5 лет, его классификации и углубления понимания его применения в медицинской практике, был осуществлен

дополнительный поиск в научных базах данных, включая Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), PubMed и Google Scholar. Поиск проводился с использованием ключевых слов, отражающих основные аспекты интересующей области: «искусственный интеллект», «artificial intelligence», «системы», «медицинские изделия», «medical devices», «машинное обучение», «machine learning», «медицина», «medicine», «классификация», «classification», «taxonomy», «specification», «спецификация», «metrics».

Кроме того, для сбора данных о метриках диагностической точности исследуемых ПО на основе ИИ были изучены официальные веб-ресурсы разработчиков. Этот подход позволил получить непосредственную информацию о технических характеристиках и возможностях ИИ, а также о методологиях, применяемых для оценки их эффективности в клинической практике.

Таким образом, найдено и проанализировано более 50 публикаций и веб-ресурсов. В ходе проведенного исследования были собраны данные о метриках диагностической точности как отечественного, так и зарубежного ПО на основе ИИ, используемого в лучевой диагностике. Полученная информация стала основой для выполнения сравнительного анализа, направленного на выявление различий и сходств в представлении метрик диагностической точности между различными медицинскими ПО на основе ИИ.

Критерии исключения публикаций и веб-ресурсов из последующего анализа: нет данных о метриках диагностической точности (не указаны).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследования обнаружена значимая проблема: разработчики программного обеспечения, основанного на технологиях ИИ, часто не раскрывают метрики диагностической точности своих продуктов. На веб-платформах, специализирующихся на медицинском оборудовании, доступная информация зачастую не отражает реальные показатели диагностической точности и носит преимущественно маркетинговый характер. Более того, разработчики ПО на основе ИИ предпочитают не публиковать научные статьи, связанные с их разработками, и чаще всего не предоставляют данные, используемые при подаче заявок на регистрацию продуктов в регуляторные органы, такие как FDA или Росздравнадзор. Существующие классификации ПО на основе ИИ, разработанные другими авторами, сосредоточены на технических характеристиках систем, в то время как клиническая применимость остается вне их внимания [4]. Это обстоятельство существенно затрудняет комплексную оценку диагностической точности различного ПО на основе ИИ и его взаимозаменяемости.

В таблице 1 представлены примеры того, как разработчики ИИ из области компьютерного

Таблица 1 — Примеры указания метрик диагностической точности со стороны разработчиков ПО на основе ИИ, зарегистрированных как медицинские изделия в Росздравнадзоре и FDA.

ПО на основе ИИ в лучевой диагностике	Коэффициент Дайса-Серенсёна	Точность (Accuracy)	Коэффициент внутриклассовой корреляции	Площадь под кривой (AUC)	Чувствительность	Специфичность
iCAS [6]	0,86±0,17	–	–	–	–	–
AVIEW CAC [7]	0,58±0,08	99,2%	0,958	–	0,83	0,83
AI-Rad Companion (Pulmonary) [8]	–	0,88	–	90%	–	–
inHEART Models [9]	от 79,8% до 87,3%	–	–	–	–	–
ПроРодинки [10]	–	92%	–	–	–	–
WEBIOMED [11]	–	78%	–	0,77	–	–
Botkin.AI [12]	–	–	–	92,74	0,902 (далее 100%)	0,937 (93,7%)
Sciberia Lungs [13]	–	99%	–	–	–	–

Таблица 1 — Примеры указания метрик диагностической точности со стороны разработчиков ПО на основе ИИ, зарегистрированных как медицинские изделия в Росздравнадзоре и FDA (продолжение)

ПО на основе ИИ в лучевой диагностике	Коэффициент Дайса-Серенсёна	Точность (Accuracy)	Коэффициент внутриклассовой корреляции	Площадь под кривой (AUC)	Чувствительность	Специфичность
Платформа третье мнение [14]	–	–	–	0,910 (далее 91%)	81,7%	94,5%
ЦЕЛЬС [15]	–	–	–	91%	85%	93%
ТУ 62.01.29-001-96876180-2019 (Фтизисбиомед) [16]	–	0,92	–	0,95	0,92	0,92

зрения в лучевой диагностике раскрывают метрики диагностической точности. Следует отметить, что большая часть ключевых метрик обычно указывается с точностью до двух десятичных знаков после запятой [5].

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработчик ПО на основе ИИ в своей публикации в разделе «проведение пилотных проектов с применением платформы ИИ» округляет значение чувствительности до ближайшего целого числа (100%), указывая эту метрику в общедоступных источниках именно в таком виде. Однако в табличных данных этой же публикации указано среднее значение чувствительности на тестовых данных в другом формате и составляет 0,902 [12]. Таким образом, 100% чувствительности (или равной 1,0) на тестовых данных достигнуто не было. Другой разработчик наоборот, указывает значения чувствительности и специфичности с очень высокой точностью, до третьего знака после запятой [14]. Если обратить внимание на индекс Дайса-Серенсёна, можно увидеть, что для ПО на основе ИИ inHEART Models представлено три знака после запятой, а для iCAS – BR/LV/LG и AVIEW CAC всего два знака.

Исходя из полученных результатов, можно говорить об определённой разобщённости в указании метрик диагностической точности различными разработчиками ПО на основе ИИ. Рассмотрим следующую ситуацию: медицинская организация (МО) внедряет ПО на основе ИИ и заявляет, что для них важно, чтобы значение AUC было $\geq 0,81$. Предположим, что при тестировании фактически достигнутое значение AUC составило 0,807, что при округлении до двух знаков после

запятой позволяет разработчику и его ПО быть допущенными к использованию в МО. Если не округлять текущее значение метрики AUC, то ПО на основе ИИ не смогло бы соответствовать указанному выше требованию. Таким образом, на основе результатов проведённого анализа была предложена классификация ПО на основе ИИ в лучевой диагностике, которая призвана уточнить требования к правилам округления и указания дробной части метрик диагностической точности. Эта классификация предназначена для использования разработчиками ПО с технологиями ИИ при регистрации программных продуктов в качестве медицинских изделий. Она направлена на обеспечение единого подхода к представлению данных о диагностической точности, что в свою очередь способствует повышению прозрачности и сравнимости информации о различных ПО на основе ИИ, используемых в медицинской практике, и, таким образом, взаимозаменяемости. Кроме того, предложенная классификация масштабируема не только на лучевую диагностику, но и на другие области здравоохранения, например, системы мониторинга, системы поддержки принятия врачебных решений.

Необходимо уточнить, что высокая степень детализации метрик не является обязательной для всего ПО на основе ИИ. Чтобы определить, какому ПО на основе ИИ действительно требуется указание максимально высокой степени точности с тремя знаками после запятой, а какому нет, мы предлагаем ориентироваться на нашу классификацию (Таблица 2) [6, 7, 9, 18]. Следует подчеркнуть, что в случае, если ПО на основе ИИ работает не автономно от врача, не используется в экстренном порядке, а также не

применяется в области поиска злокачественных новообразований, травм, нарушений кровообращения, болезней органов дыхания (в том числе COVID-19), нарушений гемостаза, заболеваний почек, достаточно указывать два знака после запятой (0.XX). В иных случаях необходимо указывать три знака (0.XXX), что более наглядно отражено в таблице 2.

Для демонстрации того факта, что в некоторых случаях важна высокая детализация указания диагностических метрик, приведём несколько примеров расчёта. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), одним из высоко летальных заболеваний является

туберкулёз (в том числе – лёгких) (www.who.int, дата обращения к сайту: 24.09.2024). По данным «Федеральной службы государственной статистики» – «здравоохранение» – «заболеваемость населения социально значимыми болезнями» впервые в жизни активный туберкулёз (<https://rosstat.gov.ru/folder/13721>) в 2022 году у взрослого населения России был выявлен у 45,6 тысяч человек. Пересчитаем количество больных, которых ПО на основе ИИ признает ошибочно здоровыми в случае указания диагностической метрики (чувствительность) до двух десятых, вместо трёх десятых (Таблица 3), в случае массовых диагностических исследований.

Таблица 2 — Классификация ПО на основе ИИ и представление дробной части метрик диагностической точности в зависимости от предназначения ПО

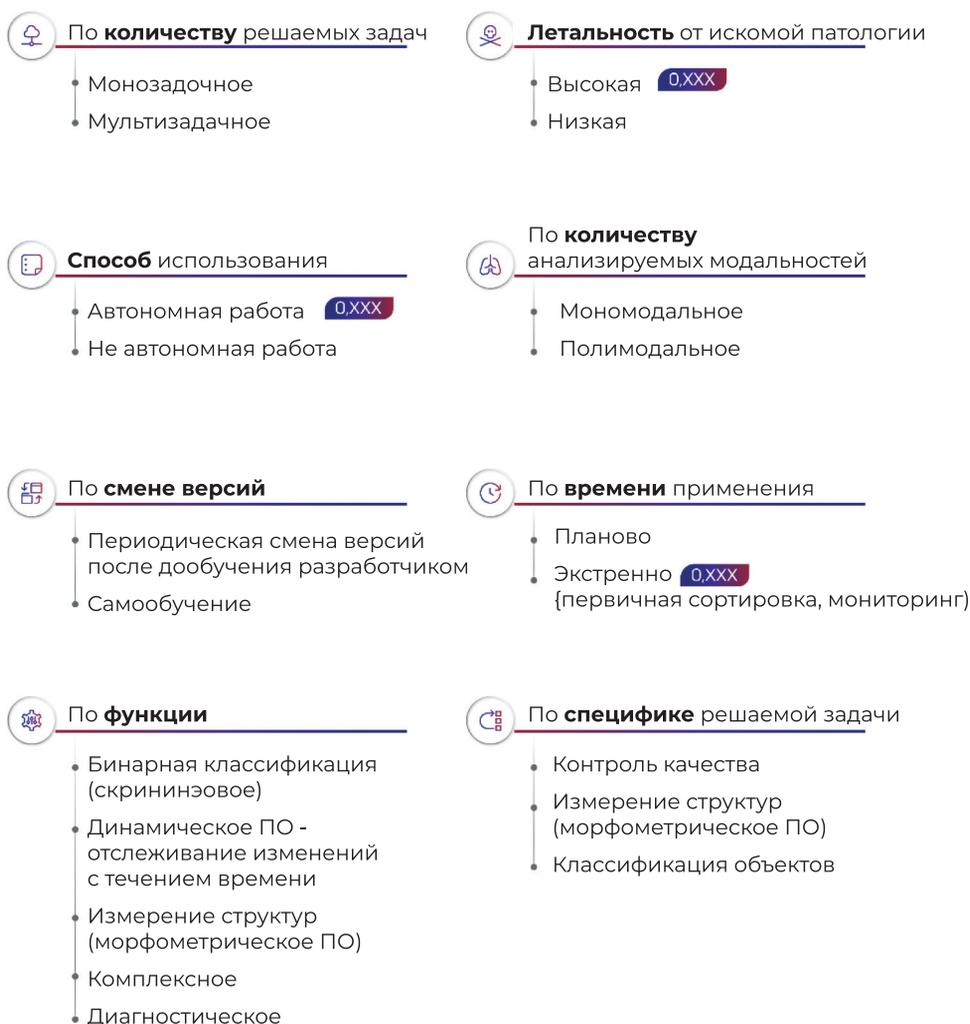


Таблица 3 — Расчёт количества людей (на 1000 человек), которых ПО на основе ИИ признает ошибочно здоровыми в зависимости от уровня чувствительности, когда на самом деле у них туберкулёз

Значение чувствительности	Количество больных туберкулёзом, которых ПО на основе ИИ признает ошибочно здоровыми на 1000 человек
0,8	200
0,84	160
0,836	164

Таблица 4 — Расчет количества пациентов (на 100 человек), которым будет ошибочно введён препарат при заданном уровне специфичности

Значение специфичности	Препарат будет введён по ошибке этому количеству человек
0,8	20
0,84	16
0,836	16,4

Таким образом, если разработчик округляет значение метрики с реальных 0,836 до чувствительности равной 0,84 – это приведёт к недооценке реального количества больных туберкулёзом. При чувствительности равной 0,836 – на самом деле будет пропущено на 4 человека с туберкулёзом больше, чем заявляет разработчик с чувствительностью 0,84. Может возникнуть вопрос – тогда почему не указывать значение метрик диагностической точности с ещё большей точностью? Данный вопрос является дискуссионным. В текущей публикации мы предлагаем остановиться на максимальных трех знаках после запятой. Однако, мы предполагаем, что всё зависит от того, в какой конкретной области применяется ПО на основе ИИ, на экономических затратах, связанных с недообследованными пациентами и другими факторами.

Однозначно, высокая точность указания диагностических метрик важна для ПО на основе ИИ, используемых в целях оказания экстренной (неотложной) помощи. Например, ИИ-система предназначена для решения о введении норадреналина в случае шокового состояния пациента без наблюдения врача реаниматолога (автономная система). Более высокий уровень специфичности даст для конечного пользователя (врач-реаниматолог) понимание того, насколько можно доверять такой ИИ-системе (Таблица 4) [18].

Таким образом, при указании со стороны разработчика всего двух знаков после запятой снова наблюдается та же ситуация, что и с чувствительностью. Одновременно с этим, указание всего одного знака после запятой сильно занижает реальную пользу ПО на основе ИИ.

Почему тогда не указывать для любого вида ПО на основе ИИ всегда три знака после запятой? Рассмотрим этот вопрос на примере ПО для морфометрических исследований. Для ПО на основе ИИ для морфометрических исследований (измерений линейных и других размеров анатомических и патологических структур) в лучевой диагностике указание двух знаков после запятой в индексе Дайса-Серенсена является достаточным и предпочтительным. Это решение основано на анализе ошибок, которые допускают сами врачи-рентгенологи при проведении исследований, а также на основании погрешности измерений, которую даёт медицинское оборудование. Двух знаков после запятой вполне достаточно, чтобы отразить реальную способность ПО на основе ИИ измерять органы и ткани без необходимости абсолютной точности. Учитывая вариативность ошибок измерения даже среди профессиональных медицинских работников, подобное представление метрик диагностической точности обеспечивает баланс между техническими характеристиками ПО на основе ИИ и его практической применимостью [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования отмечено, что разработчики ПО стараются не раскрывать метрики диагностической точности своих продуктов в открытом доступе, что затрудняет объективную оценку реальной значимости подобного рода медицинских изделий.

Была разработана клиническая классификация для ПО на основе ИИ в лучевой диагностике, опираясь на которую можно понять, насколько важна точность передачи значения метрик диагностической точности от разработчика ПО на основе ИИ в регуляторные органы в области здравоохранения и для конечного пользователя. Потенциально, данная классификация может быть масштабируема на другие виды медицинских изделий, включающих в себя применение ПО на основе ИИ.

Выводы, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для разработки и

внедрения ПО на основе ИИ в области лучевой диагностики и в смежных областях, а также для совершенствования системы регулирования и контроля качества подобного рода медицинских изделий.

Финансирование. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Научно-методические основы цифровой трансформации службы лучевой диагностики», (№ ЕГИСУ: № 123031400118-0) в соответствии с Приказом от 22.12.2023 г. № 1258 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2024 год и плановый период 2025 и 2026 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Базовые рекомендации к работе сервисов искусственного интеллекта для лучевой диагностики: методические рекомендации / сост. С. П. Морозов, Л. Р. Абуладзе, А. Е. Андрейченко и др. // Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». – Вып. 119. – М.: ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», 2022. – 68 с. [Bazovye rekomendacii k rabote servisov iskusstvennogo intellekta dlja luchevoj diagnostiki: metodicheskie rekomendacii. S. P. Morozov, L. R. Abuladze, A. E. Andrejchenko, et al. Serija «Luchshie praktiki luchevoj i instrumental'noj diagnostiki». M.: GBUZ «NPKC DiT DZM», 2022; 119: 68. (In Russ.)]
2. Морозов С.П., Зинченко В.В., Хоружая А.Н. и др. Стандартизация искусственного интеллекта в здравоохранении: Россия выходит в лидеры // Врач и информационные технологии. – 2021. – №2. – С.12-19. [Morozov SP, Zinchenko VV, Khoruzhaya AN, et al. Standardization of artificial intelligence in healthcare: Russia becomes the leader. Medical doctor and information technology. 2021; 2: 12-19. (In Russ.)] doi: 1025881/18110193_2021_2_12.
3. Васильев Ю.А., Владимирский А.В., Омелянская О.В. и др. Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики // Digital Diagnostics. – 2023. – Т.4. – №3. – С.252-267. [Vasilev YuA, Vladzymyrskyy AV, Omelyanskaya OV, et al. Methodology for testing and monitoring artificial intelligence-based software for medical diagnostics. Digital Diagnostics. 2023; 4(3): 252-267. (In Russ.)] doi: 10.17816/DD321971.
4. Кукшев В.И. Классификация систем искусственного интеллекта // Экономические стратегии. – 2020. – Т.6. – С.58-67. [Kukshev VI. Classification of artificial intelligence systems. Digital Society. 2020; 6: 58-67. (In Russ.)] doi: 10.33917/es-6.172.2020.58-67.
5. Jungmann F, Müller L, Hahn F, et al. Commercial AI solutions in detecting COVID-19 pneumonia in chest CT: not yet ready for clinical implementation? European Radiology. Springer Berlin Heidelberg, 2022; 32(5): 3152-3160. doi: 10.1007/s00330-021-08409-4.
6. High-rad.com [Internet]. iCAS. Available at: <https://www.high-rad.com>. Accessed 21.05.2024.
7. Corelinesoft.com [Internet]. AVIEW CAC. Available at: <https://www.corelinesoft.com>. Accessed 21.05.2024.
8. Ai-rad-companion [Internet]. AI-Rad Companion (Pulmonary) Available at: <https://www.siemens-healthineers.com/en-iq/digital-health-solutions/ai-rad-companion>. Accessed 21.05.2024.

9. Florkow MC, Nguyen CH, Sakkars RJB, et al. Magnetic resonance imaging-based bone imaging of the lower limb: Strategies for generating high-resolution synthetic computed tomography. *Journal of Orthopaedic Research*. 2024; 42(4): 843-854. doi: 10.1002/jor.25707.
10. ПроРодинки [интернет]. Доступно по: <https://prorodinki.ru>. Ссылка активна на 21.05.2024. [Prorodinki.ru. Available at: <https://prorodinki.ru>. Accessed 21.05.2024. (In Russ.)]
11. Webiomed.ru [интернет]. Доступно по: <https://webiomed.ru/products/webiomed-dhra/>. Ссылка активна на 21.05.2024. [Webiomed Available at: <https://webiomed.ru/products/webiomed-dhra/>. Accessed 21.05.2024. (In Russ.)]
12. Дрокин И.С., Еричева Е.В., Бухвалов О.Л. и др. Опыт разработки и внедрения системы поиска онкологических образований с помощью искусственного интеллекта на примере рентгеновской компьютерной томографии лёгких // *Врач и информационные технологии*. – 2019. – №3. – С.48-57. [Drokin IS, Ericheva EV, Bukhvalov OL, et al. Experience in developing and implementing an oncological formations searching system using artificial intelligence with the example of X ray computed tomography of the lungs. *Medical doctor and information technology*. 2019; 3: 48-57. (In Russ.)]
13. Sciberia Lungs [Electronic resource]. Available at: <https://sciberia.ru/?product=lungs>. Accessed 23.05.2024.
14. Программный модуль для анализа маммограмм ТУ 58.29.31-003-21494354-2021. М.: Платформа третье мнение, 2021. – С.40. [Programmnyj modul' dlja analiza mammogramm TU 58.29.31-003-21494354-2021. М.: Platforma tret'e mnenie. 2021: 1-40. (In Russ.)]
15. Матвиенко А.В. О требованиях к внедрению искусственного интеллекта в здравоохранение. ПО Цельс [интернет]. Доступно по: https://portal.egisz.rosminzdrav.ru/files/26.05.2023_Каспий_Матвиенко.pdf. Ссылка активна на 21.05.2024. [Matvienko A.V. O trebovaniyah k vnedreniyu iskusstvennogo intellekta v zdravoohranenie. PO Cel's. Available at: https://portal.egisz.rosminzdrav.ru/files/26.05.2023_Каспий_Матвиенко. Accessed 21.05.2024. (In Russ.)]
16. Классен В. Фтизисбиомед. Медицинский сервис фтизисбиомед для автоматизированного анализа рентгенограмм органов грудной клетки/флюорограмм (искусственный медицинский интеллект) [интернет]. 2021. Доступно по ссылке: https://files.sk.ru/navigator/company_files/1121134/1640275876_FBMTTM-RU.pdf. Ссылка активна на 24.05.2024. [Klassen V. Ftizisbiomed. Medicinskij servis ftizisbiomed dlya avtomatizirovannogo analiza rentgenogramm organov grudnoj kletki/flyuorogramm (iskusstvennyj medicinskij intellekt). Available at: https://files.sk.ru/navigator/company_files/1121134/1640275876_FBMTTM-RU.pdf. Accessed 24.05.2024. (In Russ.)]
17. Dice LR. Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology*. 1945; 26(3): 297-302.
18. Erickson BJ, Kitamura F. Magician's Corner: 9. Performance Metrics for Machine Learning Models. *Radiology: Artificial Intelligence*. 2021; 3(3): e200126. doi: 10.1148/ryai.2021200126.
19. de Maissin A, Vallée R, Flamant M, et al. Multi-expert annotation of Crohn's disease images of the small bowel for automatic detection using a convolutional recurrent attention neural network. *Endoscopy International Open*. 2021; 9(7): e1136-e1144. doi: 10.1055/a-1468-3964.

АЮПОВА И.О.,

к.м.н., ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: aurovaio@mail.ru

КОЛСАНОВ А.В.,

д.м.н., профессор, профессор РАН, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

ПОПОВ Н.В.,

д.м.н., доцент, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: n.v.porov@samsmu.ru

ХАМАДЕЕВА А.М.,

д.м.н., профессор, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: a.m.khamadeeva@samsmu.ru

ДАВИДЮК М.А.,

Народный университет, г. Пасадена, Калифорния, Соединенные Штаты Америки,
e-mail: maksdave@gmail.com

КИРЮКОВ С. Р.,

к.т.н., доцент, Самарский филиал ГАОУ ВО МГПУ, г. Самара, Россия, e-mail: kirukov@mgpu.ru

АЮПОВ О.Н.,

МУ «Реавиз», г. Самара, Россия, e-mail: doktor.aon@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕФАЛОМЕТРИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВ НА БОКОВЫХ ТЕЛЕРЕНТГЕНОГРАММАХ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_70

Аннотация. Цель. Оценить перспективность применения нейронных сетей для цефалометрического анализа при помощи анализа точности ручной и идентификации анатомических ориентиров на цифровых латеральных телерентгенограммах.

Материалы и методы. Выполнена разметка 100 обезличенных телерентгенограмм в боковой проекции одиннадцатью врачами- ортодонтами по 21 параметру, получено 23100 цифровых рентгеновских изображения с нанесенной на них опорной точкой. Проведено сравнение координат опорной точки с «базовой точкой», то есть усредненной координатой для каждой опорной точки среди всех ее локализаций.

Результаты. По критерию среднего отклонения от «базовой точки» наилучшая точность достигнута для вершин режущих краев центральных резцов верхней (is) (0,589, ДИ = 95%) и нижней челюстей (ii) (0,835, ДИ = 95%), а также для середины входа в турецкое седло (S) (0,662, ДИ = 95%).

Для группы ориентиров с наименьшей согласованностью, куда вошли такие точки как P₀ (4,330, ДИ = 95%), P_t (2,999, ДИ = 95%) и Va (2,887, ДИ = 95%), для автоматизации идентификаций и повышения качества цефалометрического анализа, вероятно, будет недостаточным применение только искусственных нейронных сетей и потребуются внедрение других элементов машинного обучения.

Заключение. Учитывая результаты нашего исследования, можно сделать вывод, что предложенный метод демонстрирует высокую точность для большинства точек и может быть использован для автоматизации цефалометрического анализа с дальнейшим развитием технологий машинного обучения.

Ключевые слова: согласованность экспертных оценок, идентификация опорных ориентиров, диагностические ошибки, цефалометрические ориентиры, ручная трассировка, релевантность цефалометрического анализа, нейронные сети, искусственный интеллект, ИИ, глубокое машинное обучение.

Для цитирования: Аюпова И.О., Колсанов А.В., Попов Н.В., Хамадеева А.М., Давидюк М.А., Кирюков С. Р., Аюпов О.Н. Экспериментальный анализ точности идентификации цефалометрических ориентиров на боковых телерентгенограммах. *Врач и информационные технологии.* 2025; 1: 70-81. doi: 10.25881/18110193_2025_1_70.

AYUPOVA I.O.,

PhD, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: aupovaio@mail.ru

KOLSANOV A.V.,

DSc, Professor, Professor of the RAS, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

POPOV N.V.,

DSc, Associate Professor, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: n.v.popov@samsmu.ru

KHAMADEEVA A.M.,

DSc, Professor, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: a.m.khamadeeva@samsmu.ru

DAVIDIUK M.A.,

University of the People, Pasadena, California, United States of America, e-mail: maksdave@gmail.com

KIRYUKOV S.R.,

PhD, Associate Professor, Samara branch of Moscow City University, Samara, Russia, e-mail: kirukov@mgpu.ru

AYUPOV O.N.,

Medical University «Reaviz», Samara, Russia, e-mail: doktor.aon@mail.ru

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ACCURACY OF CEPHALOMETRIC LANDMARK IDENTIFICATION IN LATERAL TELEROENTGENOGRAMS

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_70

Abstract. *Objective.* To evaluate the promising application of neural networks for cephalometric analysis by analyzing the accuracy of manual identification of anatomical landmarks on digital lateral teleroentgenographs.

Materials and Methods. Markup of 100 anonymized teleroentgenographs in lateral projection by eleven orthodontists on 21 parameters was performed, 23100 digital X-ray images with a reference point plotted on them were obtained. The coordinates of the reference point were compared with the "base point", i.e. the averaged coordinate for each reference point among all its localizations.

Results. According to the criterion of average deviation from the "base point", the best accuracy was achieved for the apices of the incisal edges of the central incisors of the maxilla (is) (0.589, CI = 95%) and mandible (ii) (0.835, CI = 95%), as well as for the middle of the entrance to the Turkish saddle (S) (0.662, CI = 95%). For the group of landmarks with the lowest consistency, which included points such as Po (4.330, CI = 95%), Pt (2.999, CI = 95%) and Ba (2.887, CI = 95%), the use of artificial neural networks alone is likely to be insufficient to automate identifications and improve the quality of cephalometric analysis and other machine learning elements will need to be implemented.

Conclusion. Considering the results of our study, we can conclude that the proposed method demonstrates high accuracy for most points and can be used to automate cephalometric analysis with further development of machine learning technologies.

Keywords: expert evaluation consistency, reference landmark identification, diagnostic errors, cephalometric landmarks, manual tracing, relevance cephalometric analysis quality, neural networks, artificial intelligence, AI, deep machine learning.

For citation: Ayupova I.O., Kolsanov A.V., Popov N.V., Khamadeeva A.M., Davidiuk M.A., Kiryukov S.R., Ayupov O.N. Experimental analysis of the accuracy of cephalometric landmark identification in lateral teleroentgenograms. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 70-81. doi: 10.25881/18110193_2025_1_70.

ВВЕДЕНИЕ

Телерадиография, или телерентгенография (ТРГ) – метод исследования лицевого скелета в боковой, фронтальной и аксиальной проекциях, выполняемый с увеличенным фокусным расстоянием. Полученные при этом снимки делаются с целью проведения цефалометрического анализа. Отличие длиннофокусной съемки от близкофокусной заключается в том, что в первом случае отсутствует проекционное увеличение объекта за счет дивергенции проходящего сквозь него луча, что обеспечивает соответствие величины визуализируемых структур истинным анатомическим размерам. В связи с этим специалист получает возможность проводить измерения непосредственно по снимку и производить расчет степени отклонения величин от среднестатистической нормы, соответствующей тому или иному типу строения лицевого скелета [1]. В настоящее время существует множество методов цефалометрического анализа в ортодонтии. Общепринятым является тот факт, что для эффективной диагностики требуется комплексный подход, включающий использование комбинации из нескольких способов. Это существенно усложняет задачу и делает процесс трудоемким. Цефалометрия может сопровождаться как случайными, так и системными ошибками, связанными с определением опорных координат [2]. Это может привести к неточным измерениям соотношений между ними [3].

Для оптимизации результатов диагностики все чаще прибегают к помощи цифровых методов, что выражается в росте предложения на рынке ПО и Web-сервисов для ортодонтической практики. Данные коммерческие продукты с успехом решили вопрос измерения линейных, угловых и индексных параметров челюстно-лицевой области пациента, но путь к полной автоматизации процесса невозможен без идентификации анатомических ориентиров с помощью машинного обучения или при помощи подходов искусственного интеллекта (ИИ) [4–9].

Работы с применением ИИ, машинного обучения и глубокого обучения для оценки и анализа ТРГ широко представлены в международных наукометрических базах данных [4, 10, 11]. Однако не утихают споры об эффективности цефалометрического анализа, выполненного в автоматизированном режиме [12]. Когда дело

доходит до меры надежности при идентификации цефалометрического ориентира, не существует определенной «достоверной координаты» или золотого стандарта, который мог бы обеспечить подтверждение того, где находится истинное местоположение ориентира [9, 13]. При тестировании точности в поиске анатомических ориентиров различными методами ИИ, некоторые исследования сравнивают их между собой, другие же – с экспертами с различным опытом клинической работы [12–22].

Кроме того, обучение искусственных нейронных сетей (ИНС) часто основано на опыте врача-эксперта и в большинстве исследований дает сопоставимые результаты [4–9, 12]. ИИ в настоящее время является инструментом, по заявлению многих авторов, позволяющим минимизировать время анализа и повысить диагностическую ценность за счет уменьшения субъективных ошибок [4, 12, 14], однако идентификация ориентиров по-прежнему остается рутинной задачей, требующей помощи врача-специалиста. Уровень качества цефалометрического анализа, выполненного в автоматизированном режиме, определяется опытом эксперта, осуществляющего проверку и коррекцию результатов, таким образом мы снова возвращаемся к возможному возникновению «человеческого фактора» и зависимости от экспертного мнения [12, 15]. Использование методов с ложной идентификацией цефалометрических ориентиров может привести к ошибочным решениям в составлении плана ортодонтического лечения [14, 20].

Подобные исследования идут на фоне того, как в настоящий момент разгораются споры о целесообразности использования многих опорных точек для диагностики аномалий челюстно-лицевой области в силу их высокой изменчивости [23–25] или сложности анатомических структур [24, 25].

Так, например, Kotuła J. et al. [24] и Kumar V. et al. [26] заявляют о ненадежности точек, включенных в большинство известных методик: A, B, Or, Po, S и N. При этом Houston W.J.B. et al. [27] отмечают, что A обладает более высокой дисперсностью положения относительно B, что подтверждается и более поздними исследованиями [30–32]. Однако в работе Kim Y.H. et al. [32] вариативность определения точки B резко увеличивается и превосходит таковую для A при

включении в работу ИНС архитектуры CNN, а в работе Hwang H.W. et al. [9] и специалисты, и YOLOv3 показывают лучшие показатели A относительно B.

В свое время высокую вариативность определения ориентиров A, B и P₀ [3] объясняли сложностью идентификации ориентиров, расположенных на кривых линиях, о чем еще в 1971 году говорили касательно точек G₀ [28] и апикальной части нижнего фронтального резца. Однако вариативность расположения точек A, B и P₀ было бы логичнее объяснить их тесной взаимосвязью с наиболее обсуждаемой в последнее время Франкфуртской горизонталью (FH). Так Kattan E.E. et al. [25] и Park J.A. [29] предлагают искать альтернативу ей, так как признают опорную точку P₀ как ненадежную координату. Сложности определения G₀ очевидно возникают вследствие необходимости геометрических построений, относительно которых необходимо производить определение ориентира, а также в силу различий в представлении экспертов и нечеткости формулировок идентификаций [13, 35].

Таким образом, актуальным на сегодняшний день является вопрос предварительного экспериментального определения валидности тех или иных цефалометрических ориентиров с дальнейшим поиском пригодных для включения в формирование выборки для обучения ИНС, так как логичнее было бы сначала определить надежность самого метода, что вероятно позволит решить многие проблемы возникающие в настоящее время в автоматизированном цефалометрическом анализе телерентгенограмм.

При подготовке выборки для обучения нейронных сетей различной архитектуры назревает острый вопрос корректности исходных данных и возможности включения тех или иных ориентиров в цефалометрический анализ в целом. Следовательно, наше исследование должно ответить на вопросы: 1. Можно ли считать выбранный метод цефалометрического анализа твердотканного профиля лица клинически достоверным. 2. Какие анатомические ориентиры врачи-специалисты определяют с наилучшей согласованностью, и, следовательно, на них возможна работа с нейронными сетями, основанными на «обучении с учителем». 3. Какие опорные координаты требуют иных подходов исследований и машинного обучения, если

будет выявлено неудовлетворительное качество идентификации их врачами-специалистами.

Таким образом, экспериментальное изучение точности идентификации цефалометрических ориентиров на телерентгенограммах в боковой проекции предвещает перспективность применения и совершенствования метода расшифровки цефалометрических данных с использованием цифровых технологий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на базе кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии ФГБОУ ВО «СамГМУ» Минздрава РФ (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации). Комитет по биоэтике при Самарском государственном медицинском университете одобрил данную научную работу, как соответствующую этическим нормам (протокол №239 от 10.11.2021).

Для достижения целей исследования был проведен библиографический анализ [8, 12, 19, 20], позволяющий считать отклонения анатомических точек до 4 мм клинически приемлемыми, до 2 мм – удовлетворительными и до 1 мм – хорошими. При этом метод исследования признается достоверным лишь в случае, когда не менее 80% координат в нем ограничено областью приемлемых значений [12]. Точность локализации ориентиров на ТРГ в боковой проекции определяет клиническую значимость используемых методов анализа.

Для изучения из архива заранее обезличенных ТРГ в боковой проекции с помощью генератора случайных чисел отобраны 100 цифровых изображений. Ранжирование выборки по полу, возрасту, наличию каких-либо нозологических форм патологии не производилось. Рентгенологические снимки были получены на аппарате Planmeca (Prolin XC) (Planmeca OY, Хельсинки, Финляндия) в градациях серого с разрешением 8 бит на пиксель, размер которого составлял 0,26 мм, и имели формат файла PNG размером 2016×2696 пикселей.

Двумя наиболее опытными специалистами были определены точки O_г и P₀, по средним координатам которых производилась ориентация

снимков для дальнейшего изучения специалистами.

Затем группой экспертов, состоящей из одиннадцати врачей ортодонтов с клиническим опытом работы от 1 до 8 лет, на изображениях мануальным методом определялись ориентиры. Разметка производилась с помощью программного обеспечения Paint.Net, при этом применялся графический инструмент «карандаш» с точностью до 1 пиксель. Это позволило повысить корректность идентификации данных.

В исследование был включен 21 твердотканый ориентир, наиболее часто применяемый при цефалометрическом анализе в ортодонтии.

Таким образом, для анализа было получено 23100 изображений с нанесенными на них анатомическими ориентирами.

После определения локализации твердотканых ориентиров автоматически с помощью скриптов Python на плоскостных изображениях происходило извлечение координат по осям x и y , формировалась первичная статистика, фильтрация выбросов и обработка данных. Исключались изображения, на которых отсутствовал ориентир, определенный специалистом, или же выявлялось наличие двух и более отдельных точек, а также размер графического отображения локализации составлял более 1 пикселя. Для оценки точности идентификации точек для каждой из них был принят «базовый ориентир», как средняя по всем специалистам координата по двум осям. Исследование проводилось на уровне надежности $\gamma = 0,95$. Случайной величиной было выбрано евклидово расстояние от точки, определенной экспертом, до «базового ориентира». Выбросы исключались в том случае, если отклонение от среднего по всем специалистам для изображения превышало значение доверительного интервала для математического ожидания.

Для оценки статистических характеристик использовались следующие формулы:

Среднее отклонение:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

(здесь и далее: n – объем выборки, x_i – значения случайной величины);

Стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2};$$

Доверительный интервал для математического ожидания:

$$(\bar{X} - t_{\gamma} \cdot s / \sqrt{n}; \bar{X} + t_{\gamma} \cdot s / \sqrt{n}),$$

где t_{γ} – параметр распределения Стьюдента, определяемый по статистическим таблицам.

Коэффициент вариации

$$K_{\text{var}} = \frac{s}{\bar{X}}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Распределение локализаций по абсолютным отклонениям для каждого из анатомических ориентиров, определенных мануальным методом на цифровых ТРГ, демонстрирует достаточную плотность расположения координат, однако по некоторым из параметров выявлена значительная вариативность идентификации.

О сложностях локализаций точек P_0 , G_0 , A , B , A_{ii} , A_{is} , A_r , G_n , G_0 , I_l , I_s , O_r , SNA , SNP говорят и данные мировой литературы [4–9, 12, 14, 19–35].

Преобразовав полученные при статистической обработке данные в формат таблицы (Табл. 1) можно увидеть, что среднее отклонение точек от «базового ориентира» до 1 мм наблюдается только у 3 анатомических ориентиров из 21; до 2 мм – у 10; до 4 мм – у 7 и координаты точки P_0 в среднем имеют неудовлетворительные отклонения (более 4 мм).

При этом максимальные отклонения по каждому из ориентиров варьировались от 4,844 мм до 17,684 мм (Рис. 1), что сильно превышает доверительные интервалы при определении анатомических координат и указывает на сильное влияние «человеческого фактора» при идентификации координат экспертами. Подобные цифры были получены и в ряде других исследований, посвященных точности идентификации цефалометрических ориентиров [9].

Анализируя полученные данные, возможно сделать заключение о сложностях, возникающих у респондентов нашего исследования при идентификации ориентиров A , A_{ii} , B_a , C , G_0 , O_r , P_0 , P_t , что согласуется с литературными данными [4–9, 12, 14, 19–35], однако не было выявлено

Таблица 1 — Результаты статистической обработки данных

Название точки	Среднее отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм	Стандартное отклонение, мм	Средний доверительный интервал, мм
A	2,132	11,196	1,752	5,890
Aii	2,336	17,685	1,837	7,570
Ais	1,767	10,532	1,518	7,254
Ar	1,234	16,835	1,600	2,114
B	1,884	8,585	1,549	3,248
Ba	2,887	15,085	2,690	6,283
C	2,632	10,261	1,949	4,442
Gn	1,242	7,935	0,969	2,456
Go	2,623	12,965	2,025	8,353
li	0,835	12,659	1,302	3,640
Is	0,589	8,268	0,827	3,135
Me	1,339	10,023	1,392	3,403
N	1,829	9,974	1,835	3,910
Or	2,582	12,217	1,954	4,522
Po	4,330	16,703	3,264	7,385
Pog	1,939	8,434	1,444	3,343
Pt	2,999	14,272	2,165	4,887
S	0,662	16,152	0,901	5,268
Se	1,121	4,844	0,762	1,845
SNA	1,500	8,919	1,462	2,849
SNP	1,309	11,376	1,164	2,494

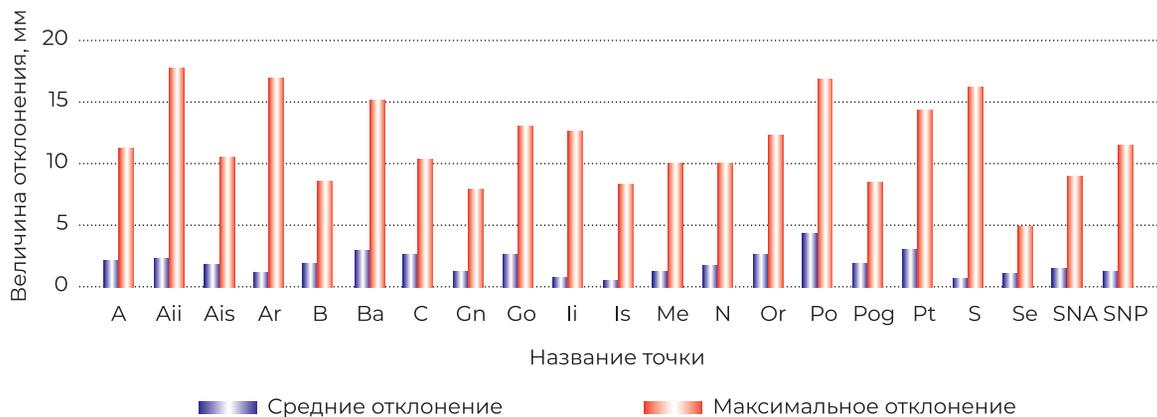


Рисунок 1 — Максимальные и средние абсолютные Величина отклонения локализации твердотканых ориентиров, мм.

существенных отклонений при локализации B, Ais, Ar, Gn, li, Is, SNA, SNP, как у других авторов (Табл. 2).

Отметим, что оценивая корреляцию данных нашего исследования с работами других авторов, можно говорить о достаточно высокой степени ее выраженности – коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,4–0,6 по

абсолютному значению. Исключение составляют лишь данные, представленные в работе Kim Y.H. et al. [32], но здесь можно отметить и практическое отсутствие корреляции между данными специалистов и CNN, полученные ими. В остальном же взаимосвязь между результатами нашего исследования и исследованиями других авторов статистически значима.

Таблица 2 — Результаты исследований в литературных источниках

Название точки	Среднее отклонение от «базового ориентира», мм						
	Наши данные	Hwang H.W. et al. [9]	Uğurlu M. [30]	Lindner C. et al. [31]	Kim Y.H. et al. [32]		
	Специалисты	Специалисты	YOLOv3	CranioCatch	FALA	Специалисты	CNN
A	2,132	2,2	2,2	5,124	1,44	1,92	1,88
Aii	2,336	3,2	2,0	3,524	–	–	–
Ais	1,767	2,8	1,8	4,870	–	–	–
Ar	1,234	0,9	1,1	5,570	1,43	1,51	2,31
B	1,884	3,3	3,9	3,416	1,26	1,23	2,01
Ba	2,887	2,0	2,4	–	–	–	–
C	2,632	1,9	1,8	–	–	–	–
Gn	1,242	2,0	2,6	2,172	0,80	–	–
Go	2,623	2,9	2,9	8,304	2,69	–	–
li	0,835	1,1	0,5	5,318	0,89	1,66	1,55
Is	0,589	1,2	0,5	1,774	0,65	1,40	1,36
Me	1,339	1,3	1,2	1,429	0,84	1,34	1,48
N	1,829	1,4	1,1	1,391	1,06	1,33	1,56
Or	2,582	1,4	1,7	2,070	1,24	0,58	1,72
Po	4,330	1,7	2,1	3,963	1,64	0,47	2,15
Pog	1,939	1,3	1,2	1,579	1,00	0,54	1,58
Pt	2,999	2,1	2,4	–	–	–	–
S	0,662	0,7	1,3	0,616	0,80	0,96	2,93
Se	1,121	–	–	–	–	–	–
SNA	1,500	2,3	2,0	4,187	1,49	2,25	2,14
SNP	1,309	1,4	1,8	5,780	0,96	0,90	1,81

Некоторые из исследователей предлагают совершенствование цефалометрического анализа с улучшением качества определения координат опорных точек по средствам внедрения элементов ИИ.

При анализе работ Hwang H.W. et al. [9], направленной на изучение 80 цефалометрических ориентиров, определенных автоматизированной системой идентификации (ИИ) на основе метода глубокого обучения You-Only-Look-Once версии 3 (YOLOv3), с координатами, идентифицированными людьми-специалистами, нам удалось провести оценку 20 параметров. По полученным данным результаты нашего исследования имели меньшие средние отклонения в точках A, Ais, B, SNA, SNB по сравнению с работой специалистов и глубокого машинного обучения; по Aii, Gn, Go, li, Is, S, Me – данные представлялись сопоставимыми, однако по восьми параметрам, рассчитанные расстояния от «базового ориентира» были выше. Рассматривая исследования работы нейронной сети CranioCatch (Эскишехир, Турция) [30], удалось сопоставить данные по идентификации

17 анатомических ориентиров: по 12 из них (A, Aii, Ais, Ar, B, Gn, Go, li, Is, Me, SNA, SNB) наше исследование показало более точные результаты определения; по параметру S – сопоставимые и в точках N, Or, Po, Pog среднее отклонение в нашей работе дало несколько большие цифры. Сопоставляя данные научных трудов по автоматизированному поиску (FALA) Lindner C. et al. [31], мы смогли проанализировать 14 параметров и сделать вывод о сопоставимости по критерию среднего отклонения у 2 ориентиров (Go, SNA), тогда как 5 параметров (S, SNP, Ar, li, Is) имели в нашем исследовании лучшие показатели, а 7 (A, B, Gn, N, Po, Or, Me) определялись специалистами хуже, нежели автоматизированными системами, однако 3 из них имели в нашем исследовании результаты по критерию среднего отклонения «хорошие» и 2 – «удовлетворительные».

Сравнивая полученные данные с результатами библиографических источников, необходимо отметить, что автоматизированные системы анализа рентгенологических изображений во многих работах давали схожую картину. Так

Tanikawa S. et al. [39] при исследовании точности локализации 18 опорных точек на боковых телерентгенограммах отмечали, что семь из них дают неудовлетворительные значения локализаций более чем в 20% (L1 (ii), Ar и N, Po, Ba, U1 (is) и Go). При этом в процессе использования предложенных авторами вариантов оптимизации обучения системы четыре ориентира (Po, Ba, U1 (is) и Go) не показали улучшений.

В нашей работе для каждого из анатомических ориентиров также определялось число изображений со средним отклонением в пределах диапазона отличных, хороших, удовлетворительных и неудовлетворительных значений (Табл. 3). При локализации точек Ba, C, Po и Pt медицинскими специалистами количество точек со средним отклонением, превышающим 4 мм, составило более 20%, а наибольшее из этих значений превышало 40% (для Po). При этом в работе Lindner C. et al. [31] наихудший

результат для FALA был получен относительно точек Go (20,25%) и Po (10,25%), а количество хороших результатов для первого параметра было также сопоставимо с нашими данными и значительно превосходило результаты для второго.

При проведении работы по проверке точности предложенной авторами модели глубокого машинного обучения с учетом вариабельности результатов, полученных разными исследователями, Kim Y. H. et al. [32] указывали на неприемлемые диапазоны точности локализаций точек Or и Po. О проблемах идентификации ориентиров A, Ar, Go, Pg' и Or заявляют и другие авторы [30].

Таким образом, выявлены существенные проблемы при локализации отдельных анатомических ориентиров, однако метод все же можно считать клинически значимым по причине высокого процента (88%) локализаций точек со значениями, входящими в диапазон удовлетворительных.

Таблица 3 — Процентное соотношение цефалометрических ориентиров с разной степенью среднего отклонения от эталонного ориентира

Наименование точки	% изображений с отклонением не более 1 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением 1–2 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением 2–4 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением более 4 мм от базового ориентира
A	29,91	28,96	27,9	13,23
Aii	25,69	28,94	30,24	15,13
Ais	37,95	29,64	24,76	7,65
Ar	60,57	25,29	9,71	4,43
B	36,96	25,26	28,07	9,71
Ba	22,34	27,81	27,66	22,19
C	19,52	26,29	33,6	20,59
Gn	51,32	30,15	16,12	2,41
Go	21,37	25,14	33,66	19,83
Ii	80,06	10,96	5,34	3,64
Is	87,21	7,18	4,31	1,3
Me	55,72	23,49	14,46	6,33
N	44,95	24,07	17,29	13,69
Or	21,27	23,74	37,38	17,61
Po	9,5	15,8	33,07	41,63
Pog	31,82	28,18	29,74	10,26
Pt	10,85	29,84	34,88	24,43
S	86,04	10,26	3,13	0,57
Se	53,71	34,5	11,5	0,29
SNA	50	23,33	18,27	8,4
SNP	50,15	32,13	13,51	4,21
Cephalometric analysis	43,57	24,33	20,32	11,78

При оценке степени согласованности мнений экспертов в качестве меры использовались коэффициенты вариации рассматриваемой случайной величины, полученные для каждой точки на 100 рентгеновских изображениях

В табл. 4 приведены средние значения коэффициентов вариации для каждой точки. Эти значения позволяют оценить согласованность мнений экспертов и сделать предварительный вывод об удовлетворительных результатах, получаемых рассмотренным методом. Тем не менее, можно отметить, что этот вывод является весьма предварительным и нуждается в дальнейшем анализе, проводимом с использованием более сложных статистических методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая результаты нашего исследования, можно сделать вывод, что предложенный метод демонстрирует высокую точность для большинства точек и может быть использован для автоматизации цефалометрического анализа с дальнейшим развитием технологий машинного обучения.

Таким образом, при подготовке обучающих данных для искусственных нейронных сетей с методом «обучения с учителем» необходимо прибегать к оценке согласованности экспертных мнений для того, чтобы избежать субъективности в оценке.

Наибольшая согласованность экспертных оценок по критерию минимальных значений среднего отклонения для твердотканного профиля лица была выявлена при определении точек *is*, *S* и *ii* со значениями – 0,589, 0,662 и 0,835 соответственно. Гипотетически, именно в этих точках, при работе ИНС покажут наилучшие результаты, так как большинством исследований доказаны сопоставимость в результатах идентификации врачей-экспертов и ИНС [1–6; 9–16].

Наименьшая согласованность получена для твердотканых точек *Ро*, *Pt* и *Ba*, значения средних отклонений составляют 4,330, 2,999 и 2,887 соответственно. Вероятно, что для автоматизации идентификации данных ориентиров и повышения качества цефалометрического анализа будет недостаточно применение ИНС и потребуются внедрение других элементов машинного обучения.

При сравнении полученных в нашей работе результатов с литературными данными необходимо отметить, что ориентиры *B*, *Gn* и *Go* имели

Таблица 4 — Значения коэффициентов вариации

Наименование точки	Средний коэффициент
A	0,6813
Aii	0,6849
Ais	0,6390
Ar	0,5563
B	0,6553
Ba	0,7240
C	0,5982
Gn	0,6792
Go	0,6637
li	0,7066
Is	0,6178
Me	0,7164
N	0,7457
Or	0,5946
Po	0,6824
Pog	0,6868
Pt	0,5526
S	0,5840
Se	0,5995
SNA	0,6555
SNP	0,6525

лучшие показатели, а ориентиры *Ba*, *C*, *N*, *Or*, *Po*, *Pog* и *Pt* требуют более глубокого анализа по ошибкам специалистов при их локализации. Например, [3, 23, 29] сообщается, что ориентиры, расположенные анатомически на кривых, подвержены ошибкам идентификации, также имеют значение уровень знаний исследователя [33], индивидуальное понимание определений ориентиров [34–36], качество цефалометрических изображений [36–38] и двоение контуров структур [37, 38]. Успех же локализации *B*, *Gn* и *Go* в нашем исследовании можно объяснить предварительной автоматизированной ориентацией снимков по Франкфуртской горизонтали, так как все эти точки располагаются на изогнутых линиях. Однако здесь стоит отметить, что проведенная манипуляция никак не улучшила идентификации *A*, *Pog*, *C*, *Or* и *Po*.

Также можно сделать выводы о перспективности разработки и совершенствования моделей глубокого машинного обучения для большинства из выбранных в эксперименте ориентиров (*Aii*, *Ais*, *Ar*, *Gn*, *li*, *Is*, *Me*, *SNA*, *SNB*), для других же (*Go*, *A* и *B*) – целесообразна разработка иных

методов идентификации, так как поиск данных координат вызывает затруднения у специалистов и не дает лучших результатов локализаций при помощи автоматизированных систем, основанных на обучении нейронных сетей [9, 30, 31]. Такие же точки, как Po и Or требуют пересмотра в концепции их определения на местности.

Несмотря на серьёзные недостатки локализации точек на боковых ТРГ, метод анализа твердотканного профиля лица более чем в 88% случаев идентификаций анатомических ориентиров

дает удовлетворительные результаты. Таким образом, его можно считать клинически достоверным. В то же время метод расшифровки цефалометрических данных нуждается в совершенствовании с помощью цифровых технологий.

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

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Рogaцкий Д.В. Лучевая диагностика в стоматологии: 2D/3D/. – М.: ТАРКОММ, 2021. – 403 с. [Rogatskii DV. Luchevaya diagnostica v stomatologii 2D/3D/. M.: TARKOMM, 2021. 403 p. (In Russ.)]
2. Kamoen A, Dermaut L, Verbeeck R. The clinical significance of error measurement in the interpretation of treatment results. *Eur J Orthod.* 2011; 14: 569-78.
3. Tng TT, Chan T, Hägg U, Cooke M. Validity of cephalometric landmarks. An experimental study. *Eur J Orthod.* 1994; 14: 110-20. doi: 10.1093/ejo/16.2.110.
4. Bichu YM, Hansa I, Bichu AY, Premjani P, Flores-Mir C, Vaid NR. Applications of artificial intelligence and machine learning in orthodontics: a scoping review. *Prog Orthod.* 2021; 22(1): 18. doi: 10.1186/s40510-021-00361-9.
5. Muraev AA, Tsai P, Kibardin I, Oborotistov N, et al. Frontal cephalometric landmarking: humans vs artificial neural networks. *Int J Comput Dent.* 2020; 23(2): 139-148.
6. Kök H, Izgi MS, Acilar AM. Determination of growth and development periods in orthodontics with artificial neural network. *Orthod Craniofac Res.* 2021; 24(S2): 76-83. doi: 10.1111/ocr.12443.
7. Yao J, Zeng W, He T, Zhou S, et al. Automatic localization of cephalometric landmarks based on convolutional neural network. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2022; 161(3): e250-e259. doi: 10.1016/j.jado.2021.09.012.
8. Londono J, Ghasemi S, Hussain SA, et al. Evaluation of deep learning and convolutional neural network algorithms accuracy for detecting and predicting anatomical landmarks on 2D lateral cephalometric images: A systematic review and meta-analysis. *Saudi Dent J.* 2023; 35(5): 487-497. doi: 10.1016/j.sdentj.2023.05.014.
9. Hwang HW, Park J, Moon JH, et al. Automated Identification of Cephalometric Landmarks: Part 2. Might It Be Better Than human? *Angle Orthod.* 2020; 90(1): 69-76. doi: 10.2319/022019-129.1.
10. Bajjad AA, Gupta S, Agarwal S, et al. Use of artificial intelligence in determination of bone age of the healthy individuals: A scoping review. *J World Fed Orthod.* 2024; 13(2): 95-102. doi: 10.1016/j.ejwf.2023.10.001.
11. Czako L, Sufliarsky B, Simko K, Sovis M, et al. Exploring the Practical Applications of Artificial Intelligence, Deep Learning, and Machine Learning in Maxillofacial Surgery: A Comprehensive Analysis of Published Works. *Bioengineering (Basel).* 2024; 11(7): 679. doi: 10.3390/bioengineering11070679.
12. Оборотистов Н.Ю., Мураев А.А., Мокренко М.Е. и др. Сравнение традиционной – ручной и автоматической систем расстановки цефалометрических точек на телерентгенограмме головы в боковой проекции в специализированных программах // Ортодонтия. – 2022. – №4(100). – С.22-29. [Oborotistov NU, Muraev AA, Mokrenko ME, et al. Sravnenie tradicionnoi – ruchnoi i avtomatizirovannoi sistem rasstanovki cephalometriccheskih toček na telerentgenogramme golovi v bokovoi proekcii v specializirovannih programmah. *Ortodontia.* 2022; 4(100): 22-29. (In Russ.)]
13. Колсанов А.В., Попов Н.В., Аюпова И.О., Ивлева А.И. Согласованность мнений экспертов при изучении позиции опорных точек для изучения мягкотканного профиля лица на цифровых телерентгенологических снимках боковой проекции черепа // Стоматология. – 2021. – №100(4). – С.49-54. [Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, Ivleva AI. Soglasovannost mneniy ekspertov pri izuchenii pozicii opornih toček dlya izucheniya myagkotkannogo prophilya licha na chiphrovih telerentgenologicheskikh snimkah bokovoi proekchii cherepa. *Stomatology.* 2021; 100(4): 49-54. (In Russ.)] doi: 10.17116/stomat202110004149.
14. Subramanian AK, Chen Y, Almalki A, Sivamurthy G, Kafle D. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence-A Comprehensive Review. *Biomed Res Int.* 2022; 2022: 1880113. doi: 10.1155/2022/1880113.
15. Kunz F, Stellzig-Eisenhauer A, Zeman F, Boldt J. Artificial intelligence in orthodontics. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie.* 2020; 81(1): 52-68. doi: 10.1007/s00056-019-00203-8.

16. Persin LS. Orthodontics. National Manual in 2 vol. T.1. Diagnosis of dentoalveolar anomalies. M.: GEOTAR-Media, 2020. P.304. doi: 10.33029/9704-5408-4-1-ONRD-2020-1-304.
17. Meric P, Naoumova J. Web-based Fully Automated Cephalometric Analysis: Comparisons between App-aided, Computerized, and Manual Tracings. Turkish Journal of Orthodontics. 2020; 33(3): 142-149. doi: 10.5152/turkjorthod.2020.20062.
18. Schwendicke F, Chaurasia A, Arsiwala L, et al. Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. Clin Oral Investig. 2021; 25(7): 4299-4309. doi: 10.1007/s00784-021-03990-w.
19. Gong BW, Chang S, Zuo FF, et al. Automated cephalometric landmark identification and location based on convolutional neural network. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2023; 58(12): 1249-1256. doi: 10.3760/cma.j.cn112144-20230829-00118.
20. Butul B, Sharab L. Obstacles behind the innovation-a peek into Artificial intelligence in the field of orthodontics. A Literature review. The Saudi Dental Journal. 2024. doi: 10.1016/j.sdentj.2024.03.008.
21. Ahn HJ, Soo-Hwan BSH, Baek SH, et al. A Comparative Analysis of Artificial Intelligence and Manual Methods for Three-Dimensional Anatomical Landmark Identification in Dentofacial Treatment Planning. Bioengineering. 2024; 11(4): 318. doi: 10.3390/bioengineering11040318.
22. Silva TP, Pinheiro MCR, Freitas DQ, et al. Assessment of accuracy and reproducibility of cephalometric identification performed by 2 artificial intelligence-driven tracing applications and human examiners. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. 2024. 137(4): 431-440. doi: 10.1016/j.oooo.2024.01.011.
23. Durão AR, Pittayapat P, Rockenbach MI, Olszewski R, et al. Validity of 2D lateral cephalometry in orthodontics: a systematic review. Prog Orthod. 2013; 14(1): 31. doi: 10.1186/2196-1042-14-31.
24. Kotuła J, Kuc AE, Lis J, Kawala B, Sarul M. New Sagittal and Vertical Cephalometric Analysis Methods: A Systematic Review. Diagnostics. 2022; 12(7): 1723. doi: 10.3390/diagnostics12071723.
25. Kattan EE, Kattan MH, Elhiny OA. A New Horizontal Plane of the Head, ID Design Press, Skopje. Repub. Maced. Open Access Maced. J. Med. Sci. 2018; 6: 767-771. doi: 10.3889/oamjms.2018.172.
26. Kumar V, Sundareswaran S. Cephalometric Assessment of Sagittal Dysplasia: A Review of Twenty-One Methods. Journal of Indian Orthodontic Society. 2014; 48(1): 33-41. doi: 10.5005/jp-journals-10021-1215.
27. Houston WJB, Maher RE, McElroy D, Sherriff M. Sources of error in measurements from cephalometric radiographs. Eur J Orthod. 1986; 14: 149-51. doi: 10.1093/ejo/8.3.149.
28. Baumrind S, Frantz RC. The reliability of head film measurements. 1. Landmark identification. Am J Orthod. 1971; 14: 111-27. doi: 10.1016/0002-9416(71)90028-5.
29. Park JA, Lee JS, Koh KS, Song WC. The use of a zygomatic arc as a reference line for clinical applications and anthropological research. Surg. Radiol. Anat. 2019; 41: 501-505.
30. Uğurlu M. Performance of a Convolutional Neural Network- Based Artificial Intelligence Algorithm for Automatic Cephalometric Landmark Detection. Turk J Orthod. 2022; 35(2): 94-100. doi: 10.5152/TurkJOrthod.2022.22026.
31. Lindner C, Wang CW, Huang CT, Li CH, et al. Fully Automatic System for Accurate Localisation and Analysis of Cephalometric Landmarks in Lateral Cephalograms. Sci Rep. 2016; 6: 33581. doi: 10.1038/srep33581.
32. Kim YH, Lee C, Ha EG, Choi YJ, Han SS. A fully deep learning model for the automatic identification of cephalometric landmarks. Imaging Sci Dent. 2021; 51(3): 299-306. doi: 10.5624/isd.20210077.
33. Durão AP, Morosolli A, Pittayapat P, et al. Cephalometric landmark variability among orthodontists and dentomaxillofacial radiologists: a comparative study. Imaging Sci Dent. 2015; 45: 213-220.
34. Lau PY, Cooke MS, Hägg U. Effect of training and experience on cephalometric measurement errors on surgical patients. Int J Adult Orthodon Orthognath Surg. 1997; 12: 204-213.
35. Аюпова И.О., Морина А.В., Колсанов А.В. и др. Сравнительная оценка методов цефалометрического анализа телерентгенограмм боковой проекции черепа // Институт стоматологии. – 2023. – №1(98). – С.76-78. [Ayupova IO, Morina AV, Kolsanov AV, et al. Sravnitel'naya ocenka metodov chephalometri-cheskogo analiza telerentgenogramm bokovoi proekcii cherepa черепа. Institut stomatologii. 2023; №1(98): 76-78. (In Russ.)]
36. Gravely JF, Benzies PM. The clinical significance of tracing error in cephalometry. Br J Orthod. 1974; 1: 95-101.
37. Колсанова А.В., Попов Н.В., Аюпова И. О. и др. Определение релевантности телерентгенографических исследований в практике врачей-ортодонт // Медицинская техника. – 2023. – №3(339). – С.29-32. [Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, et al. Opredelenie relevantnosti telerentgenographicheskikh issledovaniy v praktike vrachei- ortodontov. Medichinskaya tehnika. 2023; 3(339): 29-32. (In Russ.)]
38. Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, et al. Determination of the Usability of Telerentgenographic Studies in Orthodontic Practice. Biomedical Engineering. 2023; 57(3): 195-199. doi: 10.1007/s10527-023-10296-6.
39. Tanikawa C, Yamamoto T, Yagi M, Takada K. Automatic recognition of anatomic features on cephalograms of preadolescent children. Angle Orthod. 2010; 80(5): 812-20. doi: 10.2319/092909-474.1.

СЕДАШКИНА О.А.,

к.м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» МЗ РФ,
г. Самара, Россия, e-mail: sedashkina@inbox.ru

КОЛСАНОВ А.В.,

д.м.н., профессор, профессор РАН, ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет»
МЗ РФ, г. Самара, Россия, e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

НОМОГРАММА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ ПОЧЕК У ДЕТЕЙ, РАЗРАБОТАННАЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_82

Аннотация. Актуальность. Современные алгоритмы искусственного интеллекта позволяют получать новые знания о потенциальных факторах риска и моделировать инструменты, прогнозирующие хроническое течение заболеваний почек у детей. Управление течением хронической болезни почек (ХБП) основано на использовании инструментов, помогающих врачу своевременно прогнозировать переход от острого заболевания почек к хроническому и своевременно направить ребенка к нефрологу.

Цель исследования: разработать графический инструмент, позволяющий прогнозировать хроническую болезнь почек у детей.

Материалы и методы. Исходными данными для разработки графического инструмента (номограммы) послужили собственные результаты, опубликованные ранее. Из полученных предикторов ХБП у детей (протеинурия, гематурия, полиморфный маркер C598T гена IL4) построена прогностическая модель высокого качества (ROC-AUC>90%).

Результаты. Построенная номограмма обладает высокой прогностической ценностью – с точностью 98,9% прогнозировать ХБП у детей.

Заключение: Разработанную номограмму, можно использовать в качестве графического помощника врача для прогнозирования хронического течения заболевания у пациентов с острым заболеванием почек.

Ключевые слова: номограмма, инструмент, разработать, алгоритм, фактор.

Для цитирования: Седашкина О.А., Колсанов А.В. Номограмма для прогнозирования хронической болезни почек у детей, разработанная с помощью методов искусственного интеллекта. Врач и информационные технологии. 2025; 1: 82-89. doi: 10.25881/18110193_2025_1_82.

SEDASHKINA O.A.,

PhD, Associate Professor, Samara State Medical University, Samara, Russia,
e-mail: sedashkina@inbox.ru.

KOLSANOV A.V.,

DSc, Professor, Professor, Professor of RAS, Samara State Medical University, Samara, Russia,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru.

NOMOGRAM FOR PREDICTING CHRONIC KIDNEY DISEASE IN CHILDREN DEVELOPED USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_82

Abstract. *Background.* Modern artificial intelligence algorithms provide new insights into potential risk factors and modeling tools that predict the chronic course of kidney disease in children. Management of chronic kidney disease (CKD) is based on the use of tools that help the physician to timely predict the transition from acute kidney disease to chronic kidney disease and timely refer the child to a nephrologist.

Aim. To develop a graphical tool to predict chronic kidney disease in children.

Methods. The initial data for the development of the graphic tool (nomogram) were our own results published earlier. High quality prognostic model (ROC-AUC>90%) was constructed based on predictors of chronic kidney disease in children that we identified previously (proteinuria, haematuria, IL4 gene C598T polymorphic marker).

Results. The constructed nomogram has a high prognostic value – with an accuracy of 98.9% to predict CKD in children.

Conclusion: The developed nomogram can be used as a graphical assistant for physicians to predict the chronic course of the disease in patients with acute kidney disease.

Keywords: nomogram, tool, develop, algorithm, factor.

For citation: Sedashkina O.A., Kolsanov A.V. Nomogram for predicting chronic kidney disease in children developed using artificial intelligence methods. *Medical doctor and information technology.* 2025; 1:82-89. doi: 10.25881/18110193_2025_1_82.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) стремительно ворвались в современную медицину, бурно развиваясь в разных областях и заинтересовывая все большее количество исследователей. В работах используются разные алгоритмы ИИ: от методов машинного обучения, глубокого обучения до компьютерного зрения.

ИИ имеет длинную историю, начинающуюся в начале XX века с теоретических работ Тьюринга по кибернетике. Начало использования методов машинного обучения в медицине реализовывалось как серия правил «если»-«то», постепенно включая все более сложные алгоритмы, работающие аналогично человеческому мозгу. За последнее пятидесятилетие ИИ значительно изменился, и возможности его применения значительно расширились. Методы ИИ можно использовать в диагностике, прогнозировании, лечении, мониторинговании заболеваний, управлении качеством медицинской помощи и др. [1].

Нередко при описании диагностических и прогностических алгоритмов основное внимание уделяется методам. Однако для успешного принятия диагностических решений первостепенное значение имеют данные. Особенностью данных в публикациях является их разнотипность, плохая структурированность и зависимость от конкретной области [2]. Например, в кардиологии ключевыми маркерами будут одни данные, в иммунологии-другие. В настоящее время активно создаются базы данных и знаний о виртуальных пациентах [3].

Хроническая болезнь почек (ХБП) у детей представляет собой актуальную проблему по причине низкой своевременной диагностики, характеризующаясь маломанифестным или бессимптомным течением, затрудняющим диагностику, и трудностью лечения. Заболевания почек приводят к нарушению гомеостаза в организме, нарушению сосудистого сопротивления и глобально влияют на течение и исход сердечно-сосудистых, эндокринных и других заболеваний, что диктует необходимость разработки новых методов ранней прогностической диагностики хронического течения заболевания и планирования ранней тактики нефропротективной стратегии до наступления 3 стадии ХБП [4].

Ранее в нашей работе с помощью алгоритмов машинного обучения были выявлены новые прогностические признаки ХБП [5]. В настоящей работе мы сосредоточились на разработке графического инструмента (номограммы) для прогнозирования ХБП у ребенка в помощь врачу.

Как известно, протеинурия считается фактором прогрессирования заболеваний почек, и в клинической практике экскреция белка с мочой настораживает врача, заставляя пересматривать стратегию ведения пациента с заболеванием почек и добавлять в схему лечения нефропротективные препараты [6, 7]. В отличие от протеинурии, мочевого синдрома в виде гематурии (особенно незначительного или умеренного уровня при маломанифестном течении заболевания) не особенно волнует не только специалистов другого профиля, но и нефролога. Хотя из практики известно, что заболевания почек (например, IgA нефропатия), начавшиеся в детском возрасте, протекающие с незначительным или умеренным мочевым синдромом нередко приводят к нефросклерозу в молодом возрасте. Согласно определению, при сохранении мочевого синдрома более трех месяцев, острое заболевание почек можно считать хроническим, и в этом случае нужно постараться распознать факторы, способствующие хронизации процесса, а также добавлять в схему лечения нефропротективные препараты с целью замедления процесса нефросклероза [8].

За последние десятилетия исследования молекулярно-генетических механизмов, связанных с хроническими заболеваниями почек, стали важной и активно развивающейся областью медицины. Понимание клеточно-гуморальных механизмов, участвующих в воспалительных процессах, особенно тех, которые имеют иммунный генез, может сыграть ключевую роль в диагностике, лечении и профилактике заболеваний.

Использование технологий ИИ в медицине, в том числе методов машинного обучения, открывает новые знания, поскольку происходит анализ не только линейных, но и нелинейных связей и цифровые технологии способны обработать большие массивы данных, что невозможно для функции человеческого мозга. Одним из новых маркеров ХБП, распознанных с помощью методов машинного обучения, стал

полиморфный маркер *T598T* гена *IL4* [5]. Среди клинических эффектов интерлейкина 4, можно отметить его множественное влияние на иммунную систему [9]. Активность цитокина зависит от носительства полиморфного маркера гена *IL4* [10].

В педиатрии внедрение цифровых технологий в практику особенно актуально, поскольку заболевания почек, начавшиеся в детском возрасте, вносят значимый вклад в ХБП у взрослых, повышая инвалидизацию населения и требуя в дальнейшем применения дорогостоящих методов заместительной почечной терапии [11].

Цель: разработать графический инструмент для прогнозирования хронической болезни почек у детей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источники данных. Модель, построенная с помощью метода наивного Байеса (Naïve Bayes, NB) на трех переменных, совместно влияющих на ХБП: протеинурия (потеря белка), гематурия (эритроциты в моче), полиморфный маркер *T598T* гена *IL4*. Доля правильно классифицированных случаев составила 98.9% [97,3; 100,0]%, что указывает на хорошую предсказательную способность модели: как на наличие, так и на отсутствие ХБП. Модель выявляет 97,8% [95,1; 100,0] пациентов со специфичностью 100.0% [100,0; 100,0]%. Полученная прогностическая модель показывает отличную производительность (>90%), т.к. ROC-AUC составляет на тестовой выборке 0,98. В ходе исследования было определено значение точки отсечения (cut-off) ВПР, которое равно 0,5.

Исход. Прогнозирование вероятности хронического течения патологии почек при острой болезни почек.

Факторы риска / Предикторы. Протеинурия, гематурия и полиморфный маркер *T598T* гена *IL4*.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено этическим комитетом 12.04.2023 года (выписка из протокола заседания Комитета по биоэтике при СамГМУ №263).

Построение графического инструмента (номограммы). Общая выборка была случайным образом разделена на обучающую и тестовую выборку в соотношении 80:20.

Отбор признаков проведен с помощью метода RFE (Recursive Feature Elimination) на основе алгоритма RandomForest (Случайный лес).

Далее обучающая выборка была проверена на сбалансированность в зависимости от количества пациентов с исходом =1 и =0. Метод SMOTE-Tomek (Synthetic Minority Over-sampling Technique) использовали для балансировки обучающей выборки, поскольку тестовая выборка оказалась значительно меньше обучающей. В данном случае SMOTE создает синтетические примеры для меньшинства, а Tomek удаляет шумовые примеры. Это позволяет модели лучше учиться на дисбалансированных данных и повышает её стабильность.

Сначала была построена модель с помощью метода наивного Байеса (Naïve Bayes, NB), который является простым и эффективным для многих задач классификации, особенно когда входные признаки являются независимыми. Он обладает хорошей интерпретируемостью и быстро обучается, что делает его подходящим для медико-биологических исследований, где требуется быстрое получение результатов. Затем построенная прогностическая модель была трансформирована в графический инструмент (номограмму) с помощью программы ORANGE v. 3.36.2., предоставляющей возможность построения визуальных инструментов. Номограмма позволяет визуализировать входные данные и результаты прогноза, облегчая принятие решений и интерпретацию данных для клиницистов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследование включено 158 пациентов. В группе детей с ХБП (n = 128): девочек 88 (68,8%), мальчиков 40 (31,2%). В группе детей без ХБП (n = 30): девочек 18 (60,0%), мальчиков 12 (40,0%). Медиана возраста составила 6 (5,0–8,0) лет. Заболевание почек у пациентов длилось 2 (1,0–3,0) года. Дети статистически значимо не различались по полу и возрасту.

Для установления потенциальных предикторов было протестировано более 200 факторов, включающих анамнестические, перинатальные, клинические, лабораторные, генетические, иммунологические, инструментальные.

С помощью метода RFE (Recursive Feature Elimination) на основе алгоритма RandomForest

(Случайный лес), были отобраны три фактора: протеинурия, гематурия и нелинейный фактор – полиморфный маркер *T598T* гена *IL4*.

Сначала были оценены качественные предикторы. Выделенные группы детей с ХБП и без ХБП статистически не различались по полиморфным маркерам *C598T* гена *IL4*, поэтому нашего внимания не привлекли (Таблица 1).

При сравнении количественных предикторов ХБП у детей было выявлено, что в группе детей с ХБП по сравнению с группой детей без заболевания почек регистрировалась статистически значимо более высокая протеинурия (0,24 [0,07; 0,42] против 0,0 [0,0; 0,0], $p < 0,001$); гематурия (2,0 [0,0; 4,0] против 0,0 [0,0; 0,0] $p < 0,001$, таблица 2).

Участники исследования ($N = 158$) были разделены на обучающую выборку в 127 (80%) пациентов и тестовую выборку в 31 (20%) пациентов случайным образом. Выделенные группы статистически значимо не различались между собой по полу, возрасту, предикторам ХБП и исходу (наличие ХБП).

Выделенные выборки (обучающая и тестовая) статистически значимо не различались по

полу, возрасту, исходу и переменным, выбранным для построения номограммы: протеинурия, гематурия и полиморфный маркер *T598T* гена *IL4* (Таблица 3).

При проверке обучающей выборки на сбалансированность, оказалось, что пациентов с ХБП ($n = 103$; 81,1%), было больше, чем без ХБП ($n = 24$; 18,9%). В результате балансировки базы методом SMOTE-Томек получена база данных с равным количеством записей пациентов с ХБП и без ХБП – по 92 (50%).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что протеинурия, гематурия и полиморфный маркер *T598T* гена *IL4* у ребенка являются независимыми предвестниками ХБП у детей с острыми заболеваниями почек.

На основе выбранных факторов на обучающей выборке была построена прогностическая модель. В настоящей работе прогностическая модель визуализирована с помощью номограммы (Рисунок 1), позволяющей прогнозировать ХБП у детей с точностью 98,9%.

Принцип использования номограммы в данной работе: для каждого пациента необходимо

Таблица 1 — Описательная статистика полиморфного маркера *C598T* гена *IL4* у детей ($N = 158$)

Предикторы	Группа контроля (n = 30), Абс. (%)	Группа основная (n = 128), Абс. (%)	p-value	ОШ [95% ДИ]
<i>IL4 C598C</i>				$p = 0,713$
присутствует	11 (37,0%)	55 (43,0%)		
отсутствует	19 (63,0%)	73 (57,0%)		
<i>IL4 C598T</i>			$p = 0,592$	1,27 [0,54; 3,0]
присутствует	21 (70,0%)	83 (64,8%)		
отсутствует	9 (30,0%)	45 (35,2%)		
<i>IL4 T598T</i>			$p = 1,0$	1,19 [0,25; 5,74]
присутствует	28 (93,0%)	118 (92,2%)		
отсутствует	2 (7,0%)	10 (7,8%)		

Таблица 2 — Описательная статистика количественных предикторов у детей ($N = 158$)

Предикторы	Группа контроля, (n = 30), Ме [Q1-Q3]	Группа основная, (n = 128), Ме [Q1-Q3]	p-value
Протеинурия	0,0 [0,0; 0,0]	0,24 [0,07; 0,42]	$p < 0,001$
Гематурия	0,0 [0,0; 0,0]	2,0 [0,0; 4,0]	$p < 0,001$

найти положение каждой переменной на соответствующей оси, провести перпендикуляр к оси абсцисс для определения количества баллов, затем суммировать общее количество баллов от всех переменных, далее спроецировать общее количество баллов на линию вероятности эволюции ХБП, чтобы определить риски перехода

острой патологии почек в хроническое заболевание.

Таким образом, построенная номограмма обладает высокой прогностической ценностью, что позволяет выделять группы пациентов низкого и высокого рисков по хроническому течению заболевания почек.

Таблица 3 — Описательная статистика пациентов в обучающей и тестовой выборках (N = 158)

Характеристики	Тестовая выборка (n = 31)	Обучающая выборка (n = 127)	p-value
Пол:			
0 – мальчики	21 (68,0%)	85 (66,9%)	p = 0,931
1 – девочки	10 (32,0%)	42 (33,1%)	
Возраст, лет	7,0 [5,0; 8,0]	6,0 [4,0; 8,0]	p = 0,195
Предикторы			
Протеинурия	0,06 [0,0; 0,22]	0,07 [0,0; 0,39]	p = 0,487
Гематурия	0,0 [0,0; 2,0]	1,0 [0,0; 4,0]	p = 0,155
IL4 T598T			p = 1,0
0-нет	28 (93,0%)	118 (92,2%)	
1-есть	1 (3,2%)	11 (8,6%)	
Исход			
ХБП			p = 1,000
0 – нет	6 (19,0%)	24 (18,9%)	
1 – да	25 (81,0%)	103 (81,1%)	

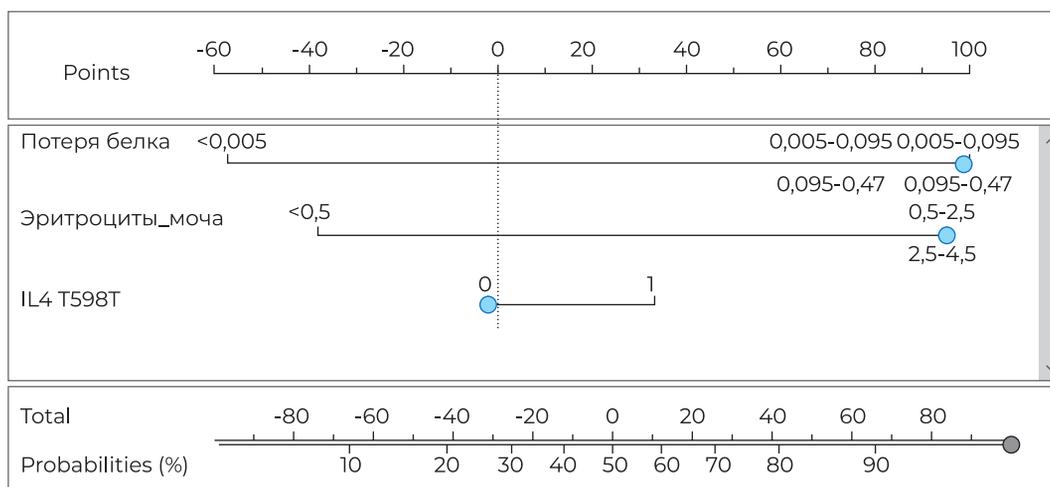


Рисунок 1 — Номограмма для прогнозирования хронической болезни почек у детей.

Примечание: потеря белка – протеинурия; эритроциты_моча – гематурия; IL4 T598T – полиморфный маркер гена IL4.

ОБСУЖДЕНИЕ

В своей работе мы постарались разработать графический инструмент в помощь врачу для выявления детей из группы с острыми заболеваниями почек в группу высокого риска прогрессирующего течения заболевания. С помощью методов машинного обучения построена модель, которая из более 200 признаков (клинических, лабораторных, генетических и инструментальных данных) выявила три потенциальных предиктора ХБП. Прогностически неблагоприятными факторами течения заболевания почек являются сохраняющиеся симптомы протеинурии и гематурии, свидетельствующие о сохранении активности воспаления в почечной ткани, даже при отсутствии экстраренальных проявлений. Наличие длительно протекающего мочевого синдрома в виде протеинурии и гематурии чаще имеет неблагоприятный исход с нарушением азотовыделительной функции почек [17, 18]. Заболевания, протекающие с гематурией, как симптомом ангиогенного воспалительного повреждения почек, труднее поддаются лечению, до настоящего времени нет единого мнения по ведению таких пациентов [19, 20].

Ограничением исследования является его одноцентровой и ретроспективный характер.

ВЫВОДЫ

Новые алгоритмы, разрабатываемые с помощью ИИ, могут оказывать неоценимую помощь

в медицине как в улучшении прогнозирования, диагностики заболеваний, так и в лечении. Прогнозирование алгоритмов ИИ в первичном звене здравоохранения может смягчить неравенство между сельскими и городскими службами здравоохранения.

Применение номограмм, построенных на прогностических моделях диагностики, благодаря их легкой интерпретации, позволит улучшить раннее выявление заболеваний у детей.

Разработанная нами номограмма демонстрирует отличную способность прогнозировать развитие прогрессирующего течения заболеваний почек у детей. Данную номограмму рекомендовано использовать врачу любой специальности при встрече с ребенком, у которого регистрируются изменения в анализе мочи. При прогнозировании развития прогрессирующего течения заболевания, такого пациента необходимо направить на консультацию к нефрологу.

Рекомендуем рассмотреть целесообразность рассмотрения гематурии и цитокина IL4, как факторов прогрессирования ХБП.

Источник финансирования. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, который необходимо обозначить.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Гусев А.В. Перспективы нейронных сетей и глубокого машинного обучения в создании решений для здравоохранения // Врач и информационные технологии. – 2017. – №3. – С.92-104. [Gusev AV. Perspektivy nejronnyh setej i glubokogo mashinnogo obucheniya v sozdanii reshenij dlya zdavoohraneniya. Vrach i informacionnyye tekhnologii. 2017; 3: 92-104. (In Russ.)]
2. Карась С. И. Виртуальные пациенты как формат симуляционного обучения в непрерывном медицинском образовании (обзор литературы) // Бюллетень сибирской медицины. – 2020. – №19(1). – С.140-149. [Karas' SI. Virtual'nye pacienty kak format simulyacionnogo obucheniya v nepreryvnom medicinskom obrazovanii. Byulleten' sibirskoj mediciny. 2020; 19(1): 140-149. (In Russ.)] doi: 10.20538/1682-0363-2020-1-140-149.
3. Карась С.И., Аржаник М.Б., Кара-Сал Э.Э. и др. Виртуальные пациенты как база проблемно ориентированной подготовки врачей-кардиологов // Бюллетень сибирской медицины. – 2020. – №19(4). – С.207-214. [Karas' SI, Arzhanik MB, Kara-Sal EE, et al. Virtual patients as a basis for problem-oriented training of cardiologists. Byulleten' sibirskoj mediciny. 2020; 19(4): 207-214. (In Russ.)]
4. Levey AS, Coresh J, Balk E, Kausz AT, et al. National Kidney Foundation practice guidelines for chronic kidney disease: evaluation, classification, and stratification. Ann Intern Med. 2003; 139(2): 137-147. doi: 10.7326/0003-4819-139-2-200307150-00013.

5. Колсанов А.В., Седашкина О.А., Постников М.А., Маковецкая Г.А. и др. Скрининг хронической болезни почек у детей с помощью алгоритмов машинного обучения // Менеджер здравоохранения. – 2024. – №5. – С.75-83. [Kolsanov AV, Sedashkina OA, Postnikov MA, Makovetzkaaya GA, et al. Skrining xronicheskoy bolezni pochek u detej s pomoshh`yu algoritmov mashinnogo obucheniya. Menedzher zdravooxraneniya. 2024; 5: 75-83. (In Russ.)] doi: 10.21045/1811-0185-2024-5-75-84.
6. Ng DK, Pierce CB. Kidney Disease Progression in Children and Young Adults With Pediatric CKD: Epidemiologic Perspectives and Clinical Applications. *Semin Nephrol.* 2021; 41(5): 405-15. doi: 10.1016/j.semnephrol.2021.09.002.
7. Kaggle. Kidney Disease Prediction. Available at: <https://www.kaggle.com/code/niteshyadav3103/chronic-kidney-disease-prediction-98-accuracy>. Accessed May 12, 2024.
8. KDIGO 2024 Clinical Practice Guideline for the Evaluation and Management of Chronic Kidney Disease. doi: 10.1016/j.kint.2023.10.018.
9. Кетлинский С.А., Симбирцев А.С. Цитокины. СПб.: Фолиант; 2008. [Ketlinskij SA, Simbircev AS. Citokiny. SPb.: Foliant; 2008. (In Russ.)]
10. Мироманов А.М., Миронова О.Б., Мироманова Н.А. Полиморфизм гена интерлейкина-4-589С>Т и экспрессия интерлейкина-4 у пациентов с развитием хронического травматического остеомиелита // Медицинская иммунология. –2018. – №20(6). – С.889-894. [Miromanov AM, Mironova OB, Miromanova NA. Interleukin-4-589C>T gene polymorphism and interleukin-4 expression in patients with the development of chronic traumatic osteomyelitis. *Medical Immunology (Russia).* 2018; 20(6): 889-894. (In Russ.)] doi: 10.15789/1563-0625-2018-6-889-894.
11. Дятлов С.П. Использование цифровых технологий как одно из направлений решения проблемы качества российского здравоохранения // Бизнес-образование в экономике знаний. – 2023. – №2(25). [Dyatlov SP. The use of digital technologies as one of the directions of solving the problem of the quality of Russian health care. *Biznes-obrazovanie v ekonomike znaniy.* 2023; 2(25). (In Russ.)]
12. Kanda E, Epureanu BI, Adachi T, Kashihara N. Machine-learning-based Web system for the prediction of chronic kidney disease progression and mortality. *PLOS Digit Health.* 2023; 2(1): e0000188. doi: 10.1371/journal.pdig.0000188.
13. Steyerberg EW, Vickers AJ, Cook NR, Gerds T, Gonen M, Obuchowski N., et al. Assessing the performance of prediction models: a framework for traditional and novel measures. *Epidemiol Camb Mass.* 2010; 21(1): 128-38. doi: 10.1097/EDE.0b013e3181c30fb2.
14. Schlattmann P. Tutorial: statistical methods for the meta-analysis of diagnostic test accuracy studies. *Clin Chem Lab Med.* 2023; 61(5): 777-794. doi: 10.1515/cclm-2022-1256.
15. Zhang Z, Rousson V, Lee WC, Ferdynus C, Chen M, Qian X, Guo Y; written on behalf of AME Big-Data Clinical Trial Collaborative Group. Decision curve analysis: a technical note. *Ann Transl Med.* 2018; 6(15): 308. doi: 10.21037/atm.2018.07.02.
16. Jiang J, Liu X, Cheng Z, Liu Q, Xing W. Interpretable machine learning models for early prediction of acute kidney injury after cardiac surgery. *BMC Nephrol.* 2023; 24(1): 326. doi: 10.1186/s12882-023-03324-w.
17. Reed BY, Masoumi A, Elhassan E, McFann K, Cadnapaphornchai MA, Maahs DM, et al. Angiogenic growth factors correlate with disease severity in young patients with autosomal dominant polycystic kidney disease. *Kidney Int.* 2011; 79(1): 128-34. doi: 10.1038/ki.2010.355.
18. Urbina E. Noninvasive assessment of target organ injury in children with the metabolic syndrome. *J Cardiometab Syndr.* 2006; 1(4): 277-81. doi: 10.1111/j.1559-4564.2006.05799.x.
19. Kashtan CE, Adam MP, Feldman J, Mirzaa GM, et al. Alport Syndrome. Seattle (WA): University of Washington, Seattle; 1993. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK1207/>. Accessed May 12, 2024.
20. Marques C, Carvelli J, Biard L, Faguer S, et al. Prognostic Factors in Anti-glomerular Basement Membrane Disease: A Multicenter Study of 119 Patients. *Front Immunol.* 2019; 10: 1665. doi: 10.3389/fimmu.2019.01665.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В журнал «Врач и информационные технологии» принимаются статьи и сообщения по наиболее значимым вопросам здравоохранения, информатизации и создания единого отраслевого информационного пространства. Принятые статьи публикуются бесплатно. Рукописи статей авторам не возвращаются.

1. Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями. Рукописи, оформленные не в соответствии с требованиями, к публикации не принимаются и не рассматриваются.
2. Статья должна сопровождаться:
 - направлением руководителя организации/учреждения в редакцию журнала. Письмо должно быть выполнено на официальном бланке учреждения, подписано руководителем учреждения и заверено печатью;
 - экспертным заключением организации/учреждения о возможности опубликования в открытой печати;
 - подписями всех авторов, заявленных в исследовании, и сведениями, включающими имя, отчество, фамилию, ученую степень и/или звание, и место работы;
 - сопроводительные документы должны быть в формате pdf или jpg.
3. Не допускается направление в редколлегию работ, напечатанных в других изданиях или уже отправленных в другие редакции. Объем оригинальных научных статей не должен превышать 15 страниц, с учетом вышеизложенных требований; обзорных статей — 25 страниц.
4. Авторы опубликованных материалов несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений.
 - Автор несет ответственность за достоверность информации.
 - Автор, направляя рукопись в Редакцию, принимает личную ответственность за оригинальность исследования, поручает Редакции обнародовать произведение посредством его опубликования в печати.
 - Плагиатом считается умышленное присвоение авторства чужого произведения науки, мысли, искусства или изобретения. Плагиат может быть нарушением авторско-правового законодательства и патентного законодательства и в качестве таковых может повлечь за собой юридическую ответственность Автора.
 - Автор гарантирует наличие у него исключительных прав на использование переданного Редакции материала.
 - Редакция не несет ответственности перед третьими лицами за нарушение данных Автором гарантий.
5. Текст рукописи должен быть тщательно выверен и не содержать грамматических, орфографических и стилистических ошибок.
6. Текст рукописи должен быть выполнен в формате MS (*.doc, *.docx), размер кегля 14, шрифт Times New Roman, межстрочный интервал 1,5, поля обычные, выравнивание по ширине. Страницы нумеруют, начальной считается титульная страница. Необходимо удалить из текста статьи двойные пробелы. Статья должна быть представлена в электронном варианте и переслана по электронной почте: vit-j@pirogov-center.ru в виде прикрепленного файла.
7. При описании клинических наблюдений не допускается упоминание фамилий пациентов, номеров историй болезни, в том числе на рисунках.
8. Иллюстративный материал (черно-белые и цветные фотографии, рисунки, диаграммы, схемы, графики) размещают в тексте статьи в месте упоминания (jpg, разрешение не менее 300 dpi). Они должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff или JPEG, с разрешением не менее 300 dpi и последовательно пронумерованы. Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. Подписи к рисункам должны быть отделены от рисунков, располагаться под рисунками, содержать порядковый номер рисунка, и (вне зависимости от того, располагаются ли рисунки в тексте или на отдельных страницах) представляются на отдельных страницах в конце публикации.
9. Таблицы (вне зависимости от того, располагаются ли они в тексте или на отдельных страницах) должны быть представлены каждая на отдельной странице в конце рукописи. Таблица должна иметь порядковый номер и заголовок, кратко отражающий ее содержание. Заглавие «Таблица ...» располагается в отдельной строке и центрируется по правому краю.
10. Сокращения расшифровывают при первом упоминании в тексте. Не используются сокращения, если термин появляется в тексте менее трех раз. Не используются сокращения в аннотации, заголовках и названиях статей. В конце статьи прилагается расшифровка всех аббревиатур, встречаемых в тексте.
11. Все физические величины рекомендуется приводить в международной системе СИ. Без точек пишется: ч, мин, мл, см, мм (но мм рт. ст.), с, мг, кг, мкг (в соответствии с ГОСТ 7.12-93). С точками: мес., сут., г. (год), рис., табл. Для индексов используется верхние (кг/м²) или нижние (СН₄DS₂-VAsc) регистры. Знак мат. действий и соотношений (+, -, x, /, =, ~) отделяют от символов и чисел: p = 0,05. Знак ± пишется слитно с цифровыми обозначениями: 27,0±17,18. Знаки >, <, ≤ и ≥ пишутся слитно: p>0,05. В тексте рекомендуется заменять символы словами: более (>), менее (<), не более (≤), не менее (≥). Знак % пишется слитно с цифровым показателем: 50%; при двух и более цифрах знак % указывается один раз после чисел: от 50 до 70%: на 50 и 70%. Знак № не отделяется от числа: №3. Знак °C отделяется от числа: 13 °C. Обозначения единиц физических величин отделяется от цифр: 13 мм. Названия и символы генов выделяются курсивом: ген *KCNH2*.
12. Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.
13. Присланные материалы направляются для рецензирования членам редакционного совета по усмотрению редколлегии.

Более подробная информация по оформлению статьи размещена на сайте журнала <http://vit-j.ru>

