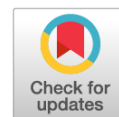


DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER696141>

EDN: DJNGLF



Роль искусственного интеллекта в реабилитации пациентов после инсульта

Т.Б. Гриненко¹, Ж.Д. Красовская¹, А.А. Салимгариева², А.А. Филиппов², Р.Р. Хакимов², И.И. Лутфарахманов³, А.И. Кагарманова³, А.Р. Файзуллина³, А.Э. Атласова², Л.С. Мелолян⁴, Р.А. Курносых⁵, К.О. Каримова³, Э.П. Уряева⁶

¹ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;

² Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия;

³ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;

⁴ Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия;

⁵ Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, Воронеж, Россия;

⁶ Казанский государственный медицинский университет, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Инсульт является одной из ведущих причин инвалидизации пациентов и смертности во всём мире, возникая вследствие нарушения кровоснабжения головного мозга и приводя к развитию выраженных неврологических нарушений, оказывающих негативное влияние на качество жизни пациентов. Технологии искусственного интеллекта (ИИ), включающие машинное обучение, свёрточные нейронные сети и интерфейсы «мозг — компьютер», позволяют воспроизводить механизмы естественного восстановления нейронных связей. Реабилитационные системы, основанные на ИИ, способны анализировать индивидуальные особенности пациента и в реальном времени адаптировать терапевтические стратегии, что аналогично процессу биологической нейропластичности мозга. Поиск источников проводился в международных и национальных электронных базах данных PubMed, Google Scholar и eLibrary.ru. Для формирования поисковых запросов использовались ключевые слова и словосочетания, отражающие основные аспекты реабилитации после инсульта с использованием технологий ИИ: «искусственный интеллект», «реабилитация после инсульта», «инсульт», «машинное обучение», «нейрореабилитация», «artificial intelligence», «stroke rehabilitation», «stroke», «neurorehabilitation», «telemedicine». Интеграция высокотехнологичных методов нейровизуализации, усиленных алгоритмами ИИ, способствовала модернизации диагностики, что особенно выражено в контексте применения технологий глубокого обучения при анализе данных компьютерной и магнитно-резонансной томографии, а также для автоматизированной идентификации ишемической полутени. Прогностическое моделирование, основанное на алгоритмах машинного обучения, позволяет предсказать такие параметры, как объём функционального восстановления, риск развития осложнений и уровень и степень инвалидизации. Интеграция ИИ в лечение пациентов после инсульта влечёт за собой ряд этических, правовых и нормативных вопросов, которые должны быть решены для обеспечения его эффективного применения. ИИ является инструментом, способным оказать положительное влияние на реабилитацию пациентов после инсульта, а его интеграция в процесс лечения имеет широкие перспективы, однако сталкивается с рядом трудностей, которые необходимо решить для полной реализации его потенциала. Несмотря на такие проблемы, как неоднородность данных и необходимость междисциплинарного сотрудничества, достижения в области технологий ИИ могут способствовать улучшению результатов реабилитации после инсульта.

Ключевые слова: искусственный интеллект; реабилитация после инсульта; инсульт; машинное обучение; виртуальная реальность; дополненная реальность; нейрореабилитация; робототехника; телемедицина.

Как цитировать:

Гриненко Т.Б., Красовская Ж.Д., Салимгариева А.А., Филиппов А.А., Хакимов Р.Р., Лутфарахманов И.И., Кагарманова А.И., Файзуллина А.Р., Атласова А.Э., Мелолян Л.С., Курносых Р.А., Каримова К.О., Уряева Э.П. Роль искусственного интеллекта в реабилитации пациентов после инсульта // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2025. Т. 28, № 4. С. 217–230. DOI: 10.17816/MSER696141 EDN: DJNGLF

DOI: <https://doi.org/10.17816/MSER696141>

EDN: DJNGLF

The Role of Artificial Intelligence in Post-Stroke Rehabilitation

Tatyana B. Grinenko¹, Zhanna D. Krasovskaya¹, Anna A. Salimgarieva², Artem A. Filippov², Riyaz R. Khakimov², Ildar I. Lutfarakhmanov³, Alfiza I. Kagarmanova³, Aigul R. Faizullina³, Azaliya E. Atlasova², Liana S. Melokyan⁴, Ruslan A. Kurnosykh⁵, Ksenia O. Karimova³, Elvira P. Uryaeva⁶

¹ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

² Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia;

³ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

⁴ Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia;

⁵ Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, Russia;

⁶ Kazan State Medical University, Kazan, Russia

ABSTRACT

Stroke remains one of the leading causes of disability and mortality worldwide. It results from impaired cerebral blood supply and leads to pronounced neurological deficits that negatively affect patients' quality of life. Artificial intelligence (AI) technologies, including machine learning, convolutional neural networks, and brain–computer interfaces, enable reproduction of mechanisms underlying natural neural recovery. AI-based rehabilitation systems are capable of analyzing individual patient characteristics and adapting therapeutic strategies in real time, which is analogous to the processes of biological neuroplasticity in the brain. The scientific data search was conducted using international and Russian electronic databases, including PubMed, Google Scholar, and eLibrary.ru. Search queries were formulated using keywords and phrases reflecting the key aspects of post-stroke rehabilitation with AI technologies: *искусственный интеллект* (artificial intelligence), *реабилитация после инсульта* (post stroke rehabilitation), *инсульт* (stroke), *машинное обучение* (machine learning), *нейрореабилитация* (neurorehabilitation), *artificial intelligence*, *stroke rehabilitation*, *stroke*, *machine learning*, *neurorehabilitation*, and *telemedicine*. The integration of advanced neuroimaging techniques enhanced by AI algorithms has contributed to the modernization of diagnostic approaches, particularly through the application of deep learning methods for the analysis of computed tomography and magnetic resonance imaging data, as well as for the automated identification of the ischemic penumbra. Prognostic modeling based on machine learning algorithms enables the prediction of functional recovery outcomes, the risk of complications, and the degree of disability. The implementation of AI in post-stroke care raises a number of ethical, legal, and regulatory challenges that must be addressed to ensure its effective use. AI is a tool capable of exerting a positive impact on the rehabilitation of patients after stroke, and its integration into the treatment process offers broad prospects; however, it is associated with a number of challenges that must be addressed to fully realize its potential. Despite such issues as data heterogeneity and the need for interdisciplinary collaboration, advances in artificial intelligence technologies may contribute to improved outcomes of post-stroke rehabilitation.

Keywords: artificial intelligence; post-stroke rehabilitation; stroke; machine learning; virtual reality; augmented reality; neurorehabilitation; robotics; telemedicine.

To cite this article:

Grinenko TB, Krasovskaya Zhd, Salimgarieva AA, Filippov AA, Khakimov RR, Lutfarakhmanov II, Kagarmanova AI, Faizullina AR, Atlasova AE, Melokyan LS, Kurnosykh RA, Karimova KO, Uryaeva EP. The Role of Artificial Intelligence in Post-Stroke Rehabilitation. *Medical and Social Expert Evaluation and Rehabilitation*. 2025;28(4):217–230. DOI: 10.17816/MSER696141 EDN: DJNGLF

Submitted: 13.11.2025

Accepted: 24.12.2025

Published online: 26.12.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Инсульт является одной из ведущих причин инвалидизации пациентов и смертности во всём мире, возникая вследствие нарушения кровоснабжения головного мозга и приводя к развитию выраженных неврологических нарушений, оказывающих негативное влияние на качество жизни пациентов [1]. Патологические механизмы, лежащие в основе инсульта, представляют собой сложный каскад процессов, включающих ишемию, эксайтотоксичность, оксидативный стресс и воспалительную реакцию, которые детерминируют повреждение нейронов и потерю их функциональной активности [1, 2]. Классификация инсульта включает три основные формы: ишемический инсульт, геморрагический инсульт и транзиторную ишемическую атаку, каждая из которых имеет свои особенности патогенеза. Ишемический инсульт, на долю которого приходится около 85% всех случаев, обусловлен окклюзией мозговой артерии тромбом или эмболом, что препятствует адекватному кровоснабжению мозга [2].

Согласно данным Американской кардиологической ассоциации (American Heart Association, АНА), заболеваемость инсультом продолжает стремительно расти (в период с 1990 по 2020 г. количество инсультов увеличилось на 70,0%, смертность вследствие инсульта — на 44,0%, его распространённость — на 86,0%, а показатель DALY — на 32%), что связано со старением популяции и увеличением распространённости таких факторов риска, как ожирение, сахарный диабет и артериальная гипертензия [3, 4]. По данным глобальных эпидемиологических исследований, в 2020 году инсульт занимал второе место среди основных причин смертности, унеся жизни около 6,6 миллиона человек, а также являлся третьим по значимости фактором утраты трудоспособности [5]. В Российской Федерации ежегодное число зарегистрированных случаев инсульта колеблется в диапазоне от 430 до 470 тысяч. При этом госпитальная летальность остаётся на высоком уровне, варьируя от 20,7% в 2020 году до 17,6% в 2022 году [6]. В 2024 году инсульт стал причиной 6,5 миллиона смертей по всему миру, а количество новых случаев составило 12,2 миллиона в год [4]. Параллельно с этим более 100 миллионов человек живут с его долгосрочными последствиями, что свидетельствует о серьёзном социально-экономическом бремени заболевания. Особенно уязвимыми остаются страны с низким и средним уровнем дохода, где доступ к мерам профилактики и специализированной помощи крайне ограничен [4]. Эти данные подчёркивают не только эпидемиологическую значимость инсульта, но и необходимость пересмотра существующих стратегий профилактики и лечения. Указанные показатели свидетельствуют о сохраняющихся проблемах в системе оказания специализированной медицинской помощи пациентам с острыми нарушениями мозгового кровообращения и подчёркивают актуальность

разработки и внедрения новых эффективных методов диагностики, лечения и реабилитации.

В свете необходимости повышения эффективности восстановительных мероприятий после инсульта особое внимание привлекает применение искусственного интеллекта (ИИ), который имитирует способность головного мозга к нейропластической реструктуризации и адаптации после повреждения [7]. Технологии ИИ, включающие машинное обучение (МО), свёрточные нейронные сети (СНС) и интерфейсы «мозг — компьютер» (Brain-Computer Interface, BCI), позволяют воспроизводить механизмы естественного восстановления нейронных связей. Реабилитационные системы, основанные на ИИ, способны анализировать индивидуальные особенности пациента и в реальном времени адаптировать терапевтические стратегии, что аналогично процессу биологической нейропластичности мозга [7]. Модели, основанные на МО и глубоком обучении (ГО), позволяют имитировать усиление нейронных связей, оптимизируя моторное обучение посредством выявления двигательных паттернов и их целенаправленного укрепления [8]. Интеграция BCI позволяет пациентам с инсультом восстанавливать двигательную активность посредством управления роботизированными устройствами или виртуальными объектами напрямую через мозговую активность [9]. Также отмечается, что технологии ИИ значительно усовершенствовали такие методы нейростимуляции, как транскраниальная магнитная стимуляция, обеспечивая индивидуализацию параметров процедуры для улучшения нейронного восстановления. Тем самым ИИ воспроизводит сложные биологические процессы реорганизации нейронных сетей, ускоряя реабилитацию и позволяя динамически корректировать лечебные мероприятия [9].

Тем не менее даже при наличии передовых технологий процесс восстановления после инсульта остаётся крайне переменчивым и зависит от многочисленных факторов, включая объём поражения, общее соматическое состояние пациента и качество проведённой реабилитации [10]. Современные подходы к реабилитации охватывают широкий спектр вмешательств, направленных на восстановление двигательных, сенсорных и когнитивных функций, включая физическую и логопедическую терапию, эрготерапию и когнитивную реабилитацию [4, 10]. Однако ограниченная персонализация традиционных методов, переменчивость исходов лечения и недостаточный доступ к ресурсам остаются существенными препятствиями на пути к оптимизации восстановительных программ [11]. Комплексное использование технологий ГО, СНС, робототехники и виртуальной реальности открывает новые горизонты для создания более эффективных и индивидуализированных стратегий восстановления [12]. Интеграция ИИ в клиническую практику позволяет повысить точность диагностики, оптимизировать планирование и динамическое управление терапией, а также расширить возможности дистанционной реабилитации. Проведённый

всесторонний анализ подчёркивает, что ИИ обладает значительным потенциалом для повышения эффективности восстановления и улучшения качества жизни пациентов, перенёсших инсульт [12, 13].

ЦЕЛЬ

Обобщить современные литературные данные и оценить роль технологий ИИ в реабилитации пациентов после инсульта, а также выявить пробелы в знаниях, требующие проведения дальнейших исследований.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ

Поиск источников проводился в международных и национальных электронных базах данных PubMed, Google Scholar и eLibrary.ru. Временной интервал охвата публикаций составил 2010–2025 гг. Языковые ограничения не использовались, однако преимущество отдавалось работам на русском и английском языках. При отборе литературы был применён двухуровневый подход. Основу составили публикации за последние 5 лет (2020–2025 гг.) (внедрение ИИ в анализ медицинских изображений, развитие гибридных VR/AR систем, телемедицинских технологий). В процессе исследования осуществлялся расширенный поиск дополнительных научных источников, содержащих данные о прогностической значимости и клинической эффективности инновационных реабилитационных методик у пациентов с инсультом.

Для формирования поисковых запросов использовались ключевые слова и словосочетания, отражающие основные аспекты реабилитации после инсульта с использованием технологий ИИ: «искусственный интеллект», «реабилитация после инсульта», «инсульт», «машинное обучение», «нейрореабилитация», «artificial intelligence», «stroke rehabilitation», «stroke», «neurorehabilitation», «telemedicine».

На первом этапе поиска было идентифицировано 13 102 публикации (PubMed — 7394, Google Scholar — 4205, eLibrary.ru — 1503). После удаления дубликатов и нерелевантных источников на основании заголовков и аннотаций к следующему этапу анализа было допущено 5647 исследований. Затем был проведён углублённый анализ 842 полнотекстовых публикаций, соответствующих тематике обзора. На этом этапе исключались статьи, не отвечающие критериям включения (например, при отсутствии клинической направленности, фокусе на остром периоде инсульта, не рецензируемые источники, протоколы и тезисы).

Критерии включения:

- оригинальные исследования (проспективные и ретроспективные когортные исследования, рандомизированные контролируемые исследования), а также обзорные статьи различного типа (систематические обзоры, метаанализы, описательные обзоры);

- полнотекстовые публикации, прошедшие рецензирование;
- работы, содержащие информацию о долгосрочной реабилитации пациентов после инсульта, психосоциальных аспектах восстановления, программах самоуправления и семейно-ориентированном подходе;
- статьи на русском и английском языках.

Критерии исключения:

- конференционные тезисы, письма в редакцию, протоколы;
- отсутствие доступа к полному тексту;
- отсутствие фокуса на долгосрочную реабилитацию или несоответствие ключевым направлениям обзора.

В результате поиска в анализ включена 80 публикация, отражающая наиболее значимые и актуальные данные по теме. Подробный алгоритм отбора представлен на рис. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ

Технологии искусственного интеллекта в диагностике, прогнозировании результатов и поддержке принятия решений у пациентов с инсультом

В остром периоде инсульта своевременная и точная диагностика имеет основополагающее значение для инициации эффективного лечения и ограничения объёмов поражения тканей головного мозга [13]. Интеграция высокотехнологичных методов нейровизуализации, усиленных алгоритмами ИИ, способствовала модернизации диагностики, что особенно выражено в контексте применения технологий ГО при анализе данных компьютерной (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ), а также для автоматизированной идентификации ишемической полутени [14, 15]. Алгоритмы ГО, относящиеся к МО, показывают высокий уровень эффективности в интерпретации данных визуализации. Благодаря большим объёмам используемых баз данных и возможности самообучения они способны распознавать многочисленные паттерны и аномалии, зачастую недоступные визуальному восприятию даже опытного специалиста [14, 15]. При анализе МРТ- и КТ-изображений алгоритмы ГО позволяют оперативно выявлять зоны ишемии и области с внутримозговыми кровоизлияниями, что значительно повышает как скорость постановки диагноза, так и диагностическую ценность проводимых мероприятий, способствуя более эффективному оказанию помощи пациентам с инсультом [15]. Усовершенствованные диагностические возможности критически важны для своевременного начала терапевтических мероприятий, таких как системный тромболизис или механическая тромбэкстракция, которые

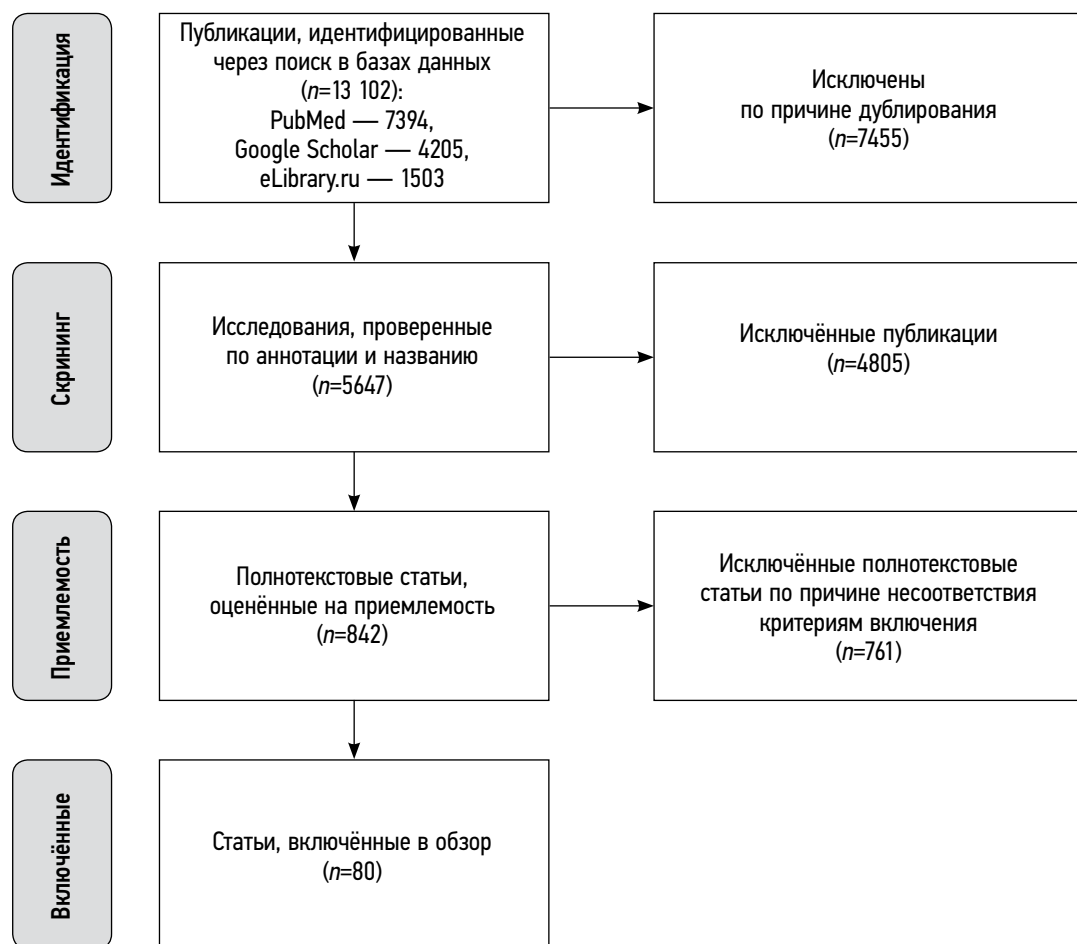


Рис. 1. Алгоритм отбора первоисточников.

Fig. 1. The algorithm for selecting primary sources.

оказывают существенное влияние на прогноз и восстановление пациента после инсульта [15].

Алгоритмы ИИ также способны определить локализации ишемической полутени (пенумбры) — функционально уязвимой, но потенциально жизнеспособной зоны головного мозга, окружающей очаг инфаркта [16]. Классические методы визуализации зачастую оказываются недостаточно чувствительными для чёткой дифференцировки данной области, что может приводить к принятию неоптимальных тактик лечения пациентов. Некоторые алгоритмы ИИ обеспечивают более точный анализ комплексных данных КТ и МРТ, позволяя достоверно идентифицировать участки мозга, находящиеся в зоне риска развития ишемии [17, 18]. Интеграция инновационных алгоритмов ГО в существующие методы нейровизуализации и использование прогрессивных вычислительных подходов позволяют ИИ эффективно различать ядро инфаркта и прилегающую к нему зону ишемической полутени, что, в свою очередь, обеспечивает возможность точечного воздействия и направленной терапии с целью сохранения потенциально обратимых участков поражения ткани головного мозга [19, 20]. Отмечается, что применение технологий ГО в анализе данных КТ и МРТ, наряду с использованием ИИ для распознавания ишемической полутени, представляет

значительный прогресс в сфере диагностики инсульта. Данные инновации способствуют повышению точности диагностических и лечебных мероприятий, более аргументированному принятию клинических решений и, в конечном итоге, улучшают исходы за счёт своевременных и персонализированных вмешательств [15, 17, 20].

В диагностике и прогностической оценке течения инсульта важную роль играют биомаркёры, способствуя более глубокому пониманию патофизиологических процессов и индивидуализации терапии [21]. Геномные биомаркёры предполагают исследование генетических вариаций, ассоциированных с предрасположенностью к инсульту, тяжестью клинических проявлений, уровнем нейропластичности и скоростью восстановления [22]. Современные генетические исследования идентифицировали целый ряд однонуклеотидных полиморфизмов (Single Nucleotide Polymorphism, SNP) и профилей экспрессии генов, статистически значимо связанных с риском развития цереброваскулярных катастроф. Анализ данных маркёров позволяет выявить предпосылки, влияющие на вероятность развития инсульта и индивидуальную реакцию организма на лечебные мероприятия [23]. Исследование генетической информации в клиническом процессе даёт специалистам возможность учитывать

молекулярно-биологические особенности пациента при разработке персонализированных стратегий ведения и реабилитации [24].

Протеомные биомаркёры направлены на выявление специфических белковых структур в крови или ликворе, образующихся в результате инсульта и отражающих патологические изменения. Изучение изменений концентрации белков, связанных с воспалительной реакцией, нейрональным повреждением и регенерацией тканей, позволяет получить ценную информацию для определения диагностических, лечебных возможностей и реабилитационных мероприятий [23, 24]. Повышение концентрации определённых маркёров, свидетельствующих о повреждении мозговой ткани, может указывать на продолжающийся патологический процесс или предсказывать степень выраженности функциональных нарушений. Протеомный анализ проливает свет на молекулярные механизмы, активирующиеся в остром и подостром периодах инсульта, способствуя более точному контролю течения заболевания и оценке эффективности применяемых терапевтических вмешательств [23, 24].

Методы МО существенно расширяют возможности предсказания исходов инсульта за счёт анализа многоуровневых данных, включающих клиническую, визуализационную и молекулярно-биологическую информацию [25]. Прогностическое моделирование, основанное на алгоритмах МО, позволяет предсказать такие параметры, как объём функционального восстановления, риск развития осложнений и степень инвалидизации [26]. Также отмечается, что данные модели способны к обучению на ретроспективных наборах данных, выявляя закономерности и взаимосвязи, лежащие в основе индивидуальных клинических сценариев [27]. За счёт интеграции данных демографических показателей, анамнестических сведений, визуализационных особенностей и биомаркёров алгоритмы МО формируют персонализированные профили риска и прогнозы восстановления пациентов после инсульта. Такой подход обеспечивает принятие более взвешенных и обоснованных решений, а также позволяет адаптировать стратегии реабилитации к индивидуальным потребностям конкретного пациента [26, 27].

Поддержка принятия решений с помощью интеграции технологий ИИ при лечении острого инсульта способствует значительному прогрессу в повышении эффективности существующих стратегий лечения, что особенно выражено в алгоритмическом принятии решений по вопросам проведения тромболитической, планирования эндоваскулярных вмешательств и помощи ИИ в структуризации клинических рекомендаций и протоколов [28]. Тромболитический, обычно проводимый в узком временном интервале после начала инсульта, включает использование тканевого активатора плазминогена (tissue plasminogen activator, tPA) с целью растворения тромбов и восстановления перфузии в сосудах головного мозга. Системы ИИ посредством проведения глубокого анализа данных, включающих

демографические данные пациента, историю болезни, результаты визуализации и биомаркёров, улучшают данный процесс [29]. Модели ГО, обученные на больших массивах данных, могут оценить вероятность успеха лечения, определяя характеристики тромба, степень ишемии мозга и риск геморрагической трансформации [29, 30]. Эти модели объединяют данные из различных источников, таких как КТ и диффузионно-взвешенная МРТ, что обеспечивает комплексную оценку риска и позволяет врачам принимать обоснованные решения о назначении тромболитиков, оптимизируя сроки лечения и отбор пациентов для достижения максимальной терапевтической эффективности и минимизации побочных эффектов [30].

При эндоваскулярной терапии, предполагающей механическое удаление тромбов с помощью катетерных методик, ИИ помогает точно спланировать и осуществить лечение. Алгоритмы ИИ анализируют передовые данные визуализации, такие как КТ-ангиография высокого разрешения или МР-ангиография, с целью оценки морфологии тромба, анатомии сосуда и коллатерального кровообращения [31]. Модели МО позволяют предсказать вероятность успешного извлечения тромба и определить наиболее эффективные стратегии вмешательства, включая выбор подходящих стент-ретриверов или аспирационных устройств, с учётом особенностей тромба и анатомии поражённых сосудов. Кроме того, ИИ может моделировать различные сценарии проведения процедур и прогнозировать возможные исходы, способствуя выбору оптимальных методик и снижению процедурных рисков. Предоставляя анализ и рекомендации в режиме реального времени, технологии ИИ повышают точность эндоваскулярных процедур и улучшают общие результаты лечения пациентов [32]. Интеграция ИИ с клиническими рекомендациями и протоколами является одним из достижений данной области. Системы ИИ могут встраиваться в электронные медицинские карты и инструменты поддержки принятия клинических решений, облегчая следование рекомендациям, основанным на фактических данных [33]. Постоянно анализируя поступающую информацию о пациенте и сравнивая её с установленными протоколами, ИИ выдаёт рекомендации в режиме реального времени. Такая интеграция обеспечивает принятие решений о лечении с учётом аспектов, прописанных в протоколах лечения, что помогает врачам оказывать стандартизированную и эффективную помощь. Возможность точного соблюдения релевантных документов базируется на способности разработанных систем ИИ к динамическому обновлению, основанному на интегрируемых данных из руководств [33].

Одним из основных технических барьеров в интеграции ИИ является качество и неоднородность данных. Для эффективного обучения алгоритмам ИИ требуются большие объёмы высококачественных данных, однако медицинские данные часто поступают из различных источников, имеющих разные форматы, стандарты и степень полноты. Обеспечение совместимости и стандартизации

данных имеет решающее значение для разработки надёжных моделей ИИ. Кроме того, для обработки и анализа таких больших массивов информации необходима высокая вычислительная мощность и развитая инфраструктура, что может являться ограничивающим фактором во многих медицинских учреждениях. Междисциплинарное сотрудничество имеет огромное значение для успешной разработки и внедрения ИИ в реабилитацию после инсульта. Сотрудничество между неврологами, специалистами по изучению данных, инженерами и экспертами по нормативно-правовому регулированию необходимо для эффективного применения технологий ИИ и их соответствия нормативным стандартам. Высокий уровень коммуникации и сотрудничества между специалистами может способствовать устранению разрыва в технологических возможностях и клинических потребностях, приводя к разработке инновационных систем ИИ в условиях здравоохранения. Несмотря на то, что использование ИИ и МО в реабилитации после инсульта всё ещё находится в начальной стадии своего развития, данные технологии активно изучаются и применяются в разных странах.

Роботизированные технологии и искусственный интеллект в контексте постинсультной реабилитации пациентов

Робототехника и ИИ находятся на передовой революции в двигательной реабилитации после инсульта, предлагая инновационные подходы к восстановлению нарушенных функций и ускорению выздоровления. Данные технологии решают проблемы двигательных нарушений и функционального восстановления благодаря усовершенствованному дизайну, адаптивному обучению и точным методам оценки [34]. Роботизированные экзоскелеты — это устройства, предназначенные для помощи и улучшения движения людей с моторными нарушениями. В контексте реабилитации после инсульта эти устройства играют решающую роль в восстановлении подвижности, обеспечивая структурированные и повторяющиеся движения, которые пациенты не могут в полном объёме выполнять самостоятельно [34]. Конструкция роботизированных экзоскелетов обычно включает лёгкие материалы и подвижные соединения, которые имитируют естественные движения конечностей [35]. Также отмечается, что экзоскелеты оснащены датчиками, которые поддерживают и направляют конечности пользователя по заранее заданным схемам движения [35]. Функциональность данных устройств выходит за рамки простой поддержки, они разработаны для обеспечения переменного сопротивления и адаптации к движениям пользователя. Такая адаптивность необходима для более эффективного процесса реабилитации и основана на конкретных потребностях пациентов [36]. Передовые системы управления, интегрированные с алгоритмами ИИ, корректируют движения экзоскелета в режиме реального времени на основе обратной связи с датчиками, которые отслеживают

двигательную активность и физиологические реакции пользователя, позволяя добиться максимального эффекта и минимизировать риск возникновения травм [37].

Обучение двигательной активности направлено на использование ИИ для повышения эффективности реабилитации за счёт адаптивного и персонализированного обучения [36, 38, 39]. Алгоритмы МО анализируют данные с роботизированных экзоскелетов, носимых датчиков и отзывы пациентов для адаптации протоколов реабилитации. Эти алгоритмы учатся на основе результатов работы пользователя, регулируя сложность и характер упражнений в соответствии с его прогрессом и возможностями. Благодаря такому адаптивному подходу реабилитационные мероприятия остаются сложными и в то же время достижимыми, что очень важно для развития нейропластичности и восстановления функций [40]. Системы ИИ также могут предсказывать и моделировать оптимальные модели движения, необходимые терапевтические вмешательства и определять эффективные методы обучения и восстановления двигательных функций посредством анализа больших массивов данных о предыдущих сеансах реабилитации и их результатах [39]. Эти модели способны предоставлять пользователям и медицинским специалистам обратную связь в режиме реального времени, сохраняя возможность внесения изменений в режим выполнения упражнений или разрабатывая новые терапевтические подходы на основе текущих данных об эффективности, что способствует индивидуализации терапии и повышает эффективность реабилитации [38–40].

Интеграция биомеханических данных (кинематики суставов, движения мышц) и сенсорной обратной связи в системы реабилитации после инсульта на базе ИИ улучшает результаты индивидуальной терапии, а также способствует процессу нейроадаптивного обучения [41]. Модели ИИ анализируют биомеханические данные с датчиков, электромиографии (ЭМГ), устройств анализа движения и его силы для определения показателей двигательной функции пациента. Благодаря этой информации ИИ может динамически изменять реабилитационные упражнения, имитируя тем самым процесс адаптивного обучения [42]. Данные о динамике мышц, полученные с помощью датчиков ЭМГ, позволяют ИИ выявлять нервно-мышечные нарушения и оптимизировать роботизированную помощь посредством управления экзоскелетом или функциональной электростимуляции для улучшения восстановления двигательной активности. ИИ, анализируя информацию, полученную от датчиков, использует технологию сенсорной обратной связи для быстрой корректировки движений [43, 44]. Устройства биологической обратной связи на базе ИИ применяют эти интегрированные данные для обеспечения слуховой, визуальной или тактильной поддержки в реальном времени, позволяя пациентам после инсульта улучшить точность движений. Кроме того, алгоритмы МО могут прогнозировать тенденции восстановления на основе данных о движении, полученных с помощью датчиков,

что позволяет специалистам отслеживать и при необходимости своевременно менять тактику лечения. Система реабилитации с ИИ создаёт концепцию, которая развивается в режиме реального времени на основе адаптивных реакций пациента, позволяя максимально повысить эффективность терапии и ускорить функциональное восстановление [44, 45].

Для определения эффективности реабилитации и отслеживания прогресса восстановления двигательной активности очень важна количественная оценка. ИИ и роботизированные системы предлагают инструменты, способные измерять и анализировать двигательную функцию с высокой точностью [46]. Датчики и системы захвата движения собирают подробные данные о кинематике конечностей, походке и мышечной активности, а алгоритмы ИИ обрабатывают полученную информацию для определения скорости и амплитуды движений, позволяя в динамике более точно оценить степень восстановления [46]. Аналитические системы на основе ИИ создают комплексные отчёты, включающие визуализацию двигательных функций с течением времени, позволяя врачам отслеживать улучшения, выявлять проблемные области и соответствующим образом корректировать тактику лечения, что способствует принятию более обоснованных решений относительно интенсивности терапии, улучшения состояния пациента и общей эффективности лечения [47].

Виртуальная и дополненная реальность в реабилитации пациентов после инсульта

Иммерсивная виртуальная реальность (virtual reality, VR) представляет собой передовой подход к реабилитации верхних конечностей у пациентов, перенёсших инсульт [48]. Системы VR используют гарнитуры и датчики отслеживания движений для погружения пациентов в виртуальную реальность, где они могут выполнять смоделированные задачи, которые находят отражение в реальной деятельности, например посредством продвижения рук или хватательных движений виртуальных объектов. Данные системы предназначены для повышения эффективности реабилитации благодаря сочетанию визуальной, слуховой и тактильной обратной связи, которые в совокупности способствуют более увлекательному и эффективному лечению пациентов [49, 50]. Эффективность VR в рамках реабилитации верхних конечностей обусловлена её способностью обеспечивать высококонтролируемую и адаптируемую среду для упражнений. Передовые VR-платформы интегрируют сложные алгоритмы и обработку данных в реальном времени для регулирования сложности задач в зависимости от показателей пациента [51, 52]. Например, VR-системы могут изменять размер, вес и расстояние до виртуальных объектов, представляя пациентам постепенно усложняющиеся сценарии, которые соответствуют их двигательным способностям. Такая адаптивность крайне важна для развития нейропластичности — способности мозга реорганизовывать

и формировать новые нейронные связи при обучении. Постоянно адаптируясь к изменяющимся возможностям пациента, VR помогает терапевтическим упражнениям оставаться сложными, но достижимыми, что важно для максимального восстановления двигательной активности [51, 52]. Кроме того, VR-технологии способны обеспечивать проведение целенаправленных тренировок по устранению двигательных дефицитов. Так, VR может быть запрограммирована на моделирование задач, требующих точных движений пальцев или скоординированных действий кистей, позволяя оказывать благоприятный эффект на устранение нарушений, наблюдаемых у пациентов после инсульта [53]. VR позволяет пациентам повторять запрограммированные задачи в контролируемой обстановке, укрепляя моторное обучение и функциональное восстановление [51, 53]. Персонализация VR-терапии усиливается за счёт включения данных о конкретном пациенте, сборе и анализе таких показателей, как точность, скорость и амплитуда движений. Эти данные используются для настройки VR-упражнений, позволяя медицинским работникам адаптировать вмешательства к уникальным потребностям каждого пациента. Например, алгоритмы, управляемые ИИ, могут анализировать данные нескольких сеансов терапии, чтобы корректировать сложность упражнений, предоставлять индивидуальную обратную связь и отслеживать прогресс с течением времени. Такой персонализированный подход не только повышает эффективность реабилитации, но и улучшает мотивацию и приверженность пациента лечению [51, 54]. Кроме того, интеграция VR с технологиями обратной связи и захвата движений ещё больше обогащает их реабилитационный эффект. Датчики могут отслеживать движения конечностей и обеспечивать дополнительную обратную связь, а системы захвата движений позволяют точно измерять углы наклона суставов и мышечную активность. Совокупность этих данных позволяет более полно оценить двигательную функцию и внести более тонкие коррективы в протоколы VR-тренировок [46].

Технология дополненной реальности (augmented reality, AR) улучшает реабилитацию после инсульта за счёт интеграции цифровой информации с физическим миром, обеспечивая динамичную и интерактивную основу для восстановления навыков. Системы AR накладывают виртуальные элементы, такие как визуальные и интерактивные подсказки, на реальное окружение, создавая погружение в процесс реабилитации [55]. Такая интеграция помогает пациентам отрабатывать реальные задачи, предоставляя индивидуальные рекомендации и обратную связь во время выполнения упражнений. При реабилитации после инсульта AR может проецировать виртуальные объекты и обучающие подсказки в поле зрения пациента, помогая ему в таких повседневных действиях, как приготовление пищи, переодевание или преодоление препятствий [56]. AR может отображать список необходимых ингредиентов и пошаговую инструкцию по приготовлению

пищи. Аналогичным образом AR может проводить пациентов через симулированные полосы препятствий, адаптируясь в реальном времени к их движениям и обеспечивая обратную связь. Такой интерактивный подход делает реабилитационные упражнения более увлекательными и непосредственно применимыми к повседневным задачам [57].

Основное преимущество AR в реабилитации после инсульта заключается в её способности преодолеть разрыв между виртуальными тренировочными средами и реальным применением. Встраивая терапевтические упражнения в повседневную деятельность, AR облегчает процесс восстановления навыков и их последующую отработку [55]. Такое обучение имеет решающее значение для восстановления функций, так как способствует интеграции терапевтических достижений пациентами в их повседневную жизнь. Например, практика по приготовлению еды с помощью AR-инструментов не только развивает моторные навыки, но и повышает способность пациента самостоятельно выполнять эту задачу на собственной кухне. AR-системы также предлагают преимущества адаптивности и персонализации [46, 58]. Анализируя данные датчиков и взаимодействия с пользователем в режиме реального времени, AR может изменять сложность и характер заданий в соответствии с прогрессом пациента, его интересами и конкретными целями реабилитации, тем самым повысив мотивацию и приверженность процессу реабилитации. Благодаря такой адаптации упражнения остаются актуальными, что способствует дальнейшему вовлечению и прогрессу [59, 60].

Алгоритмы ИИ играют ключевую роль в повышении эффективности VR- и AR-терапии при реабилитации пациентов после инсульта, поскольку способны персонализировать действия, основываясь на индивидуальных данных пациента [48, 55]. Модели МО анализируют обширные объёмы данных о взаимодействии пациентов в VR- и AR-средах с целью более эффективной и быстрой адаптации реабилитационных протоколов к прогрессу и специфическим потребностям каждого человека [61]. Например, в иммерсивных VR-средах алгоритмы ИИ регулируют уровень сложности виртуальных задач в режиме реального времени, согласуя их с двигательными способностями пациента и его реабилитационным потенциалом. Такая динамическая регулировка гарантирует, что упражнения не будут слишком лёгкими или слишком трудными, поддерживая оптимальный уровень сложности, способствующий нейропластичности и моторному обучению [48, 55, 62]. ИИ может изменять такие параметры заданий, как сложность движений, скорость и требования к точности, адаптируя реабилитационный опыт по мере улучшения состояния пациента. Аналогичным образом в AR-средах ИИ позволяет настраивать виртуальный контент для решения конкретных реабилитационных задач. Анализируя данные об эффективности AR, алгоритмы ИИ способны отображать рекомендации

по выполнению и выбору упражнений, а также прорабатывать сценарии, направленные на устранение выявленных дефицитов как в мелкой моторике, координации рук и глаз, так и в пространственном восприятии [63, 64]. Например, при нарушении мелкой моторики ИИ предлагает AR-упражнения, включающие точные движения руками или манипуляции с виртуальными объектами разной степени сложности. Системы обратной связи, управляемые ИИ, посредством проведения постоянного анализа и предоставления полученных данных ещё больше улучшают эффективность реабилитационных мероприятий. Эти системы позволяют мгновенно получить инструкции и мотивационные подсказки, помогая пациентам оценить уровень достигнутого ими прогресса, а также выявить области, требующие особого внимания. Так, ИИ может анализировать паттерны движений и предоставлять обратную связь для обеспечения правильной техники, параллельно отслеживая показатели эффективности, что позволяет отмечать достижения и поощрять дальнейшие усилия [65].

Телереабилитация на основе технологий искусственного интеллекта

Платформы телереабилитации на основе ИИ, внедрённые в рамках дистанционного здравоохранения, способны помогать медицинским работникам в персонализации, расширении и эффективном применении реабилитационных услуг. Данные системы применяют алгоритмы ИИ для разработки и реализации персональных программ реабилитации, которые адаптируются к индивидуальным потребностям пациентов [66, 67]. Процесс разработки включает интеграцию множества технологических компонентов, в том числе средства видеоконференцсвязи, носимые датчики и аналитику ИИ. Анализ данных позволяет разрабатывать персонализированные планы реабилитации, которые под контролем мультидисциплинарной комиссии способны динамически корректироваться на основе текущих показателей и прогресса [66, 67]. Например, ИИ может в режиме реального времени изменять режим упражнений в соответствии с текущими возможностями пациента или давать конкретные рекомендации по их выполнению, основываясь на обнаруженных ошибках и отклонениях от требований, выявленных в паттернах движения [66]. Реализация таких платформ предполагает интеграцию аппаратных и программных компонентов, что требует надёжных интерфейсов для связи между ИИ и устройствами пользователя. Кроме того, платформы должны быть рассчитаны на безопасную и эффективную обработку больших объёмов данных, обеспечивая защиту информации о пациенте и позволяя осуществлять обратную связь и мониторинг в режиме реального времени [68, 69].

Дистанционная оценка когнитивных и функциональных возможностей — важнейший компонент платформ телереабилитации на базе ИИ [70]. Для оценки таких когнитивных функций, как память и концентрация внимания,

часто используются инструменты, управляемые ИИ, которые анализируют ответы на интерактивные задания, речевые и поведенческие параметры [70]. Анализ проводится с помощью цифровых интерфейсов, включающих онлайн-тесты и среды виртуальной реальности, что обеспечивает проведение точной и эффективной оценки когнитивных функций [71]. Для определения физических показателей используются данные с носимых устройств и видеоанализ для определения двигательных навыков, особенностей походки и уровня физической активности [71]. Алгоритмы ИИ обрабатывают полученные данные о паттернах движений, выявляя нарушения и отслеживая изменения в режиме реального времени. Например, модели МО могут анализировать паттерны походки для выявления отклонений от нормального движения, что позволяет отслеживать динамику восстановительных мероприятий и необходимость корректировки терапии [71]. Применение систем дистанционной оценки способствует непрерывному мониторингу и позволяет в режиме реального времени корректировать программы реабилитации, основываясь на актуальных данных о пациенте. Такой подход гарантирует, что реабилитационные программы остаются актуальными и эффективными по мере продвижения пациентов по пути выздоровления [70, 71].

Несмотря на то, что платформы для телереабилитации на основе ИИ предлагают множество преимуществ, они также сталкиваются с серьёзными проблемами, связанными с подключением и соблюдением требований пациентами. Неполноценность подключения могут возникать из-за разной скорости Интернета, совместимости устройств и технических проблем, что способно оказать негативное влияние на качество удалённого взаимодействия и передачи данных [72]. Обеспечение стабильного и надёжного соединения имеет решающее значение для эффективности телереабилитации, поскольку перебои в функционировании могут помешать обратной связи и мониторингу в режиме реального времени. Ещё одной сложностью является соблюдение пациентом установленных правил, поскольку дистанционная реабилитация требует высокой самомотивации и приверженности к выполнению предписанных упражнений и проведению оценок [72]. Управляемые ИИ платформы решают данную проблему посредством включения функций напоминания, мотивирующей обратной связи, игровых элементов и механик в неигровых контекстах для повышения мотивации, вовлечённости, продуктивности и достижения целей [73]. Для решения этих проблем платформы телереабилитации должны иметь удобный интерфейс, надёжную техническую поддержку и стратегии, направленные на устранение барьеров, препятствующих соблюдению режима лечения. Эффективное обучение и поддержка как пациентов, так и медицинских работников необходимы для максимального использования потенциала телереабилитации на основе ИИ и обеспечения желаемой эффективности для восстановления пациентов [73].

Телереабилитационные решения на базе ИИ позволяют проводить интерактивные сеансы терапии и удалённый мониторинг, что делает реабилитацию более доступной для пациентов, не имеющих возможности посещать стационары.

Этические и нормативные аспекты интеграции технологий искусственного интеллекта в реабилитацию пациентов после инсульта, а также связанные с ними ограничения

Интеграция ИИ в лечение пациентов после инсульта влечёт за собой ряд этических, правовых и нормативных вопросов, которые должны быть решены для обеспечения её эффективного применения [74–76]. С этической точки зрения использование ИИ в лечении пациентов вызывает беспокойство в отношении принципов равенства, прозрачности и отчётности. Обеспечение одинакового уровня доступа к инструментам, используемым в лечении и реабилитации лиц с инсультом, основанных на технологиях ИИ, имеет решающее значение, особенно в малонаселённых и удалённых от города регионах, где ресурсы системы здравоохранения ограничены [66]. Алгоритмы ИИ должны проходить тщательную разработку и валидацию для предотвращения возникновения необъективных результатов, которые могут привести к снижению эффективности диагностики, лечения и реабилитации после инсульта [66, 75, 76]. Современные модели ИИ зачастую работают автономно и не требуют участия пользователя. Эти системы принимают решения, опираясь исключительно на алгоритмы и обучающие наборы данных. Такой подход осложняет процесс понимания оснований, лежащих в основе их выводов, что вызывает сомнения у специалистов и снижает вероятность внедрения этих технологий в клиническую практику [15, 66].

Конфиденциальность и безопасность данных имеют первостепенное значение при применении ИИ для лечения инсульта. Для эффективной работы ИИ опираются на огромные объёмы данных о пациенте, включая историю болезни, данные визуализации и информацию о мониторинге в режиме реального времени. Крайне важно сохранять высокий уровень защиты данных с целью снижения риска утечек и получения несанкционированного доступа [66]. Кроме того, системы ИИ должны быть разработаны таким образом, чтобы по возможности анонимизировать данные пациентов для дальнейшей защиты их конфиденциальности. Нормативное одобрение и стандарты для инструментов ИИ в лечении инсульта имеют важное значение для обеспечения безопасности и эффективности применения данных технологий [77]. Такие регулирующие органы, как Управление по контролю пищевых продуктов и медикаментов США (Food and Drug Administration, FDA) и Европейское агентство по лекарственным средствам (European Medicines Agency, EMA), играют ключевую роль в экспертизе

медицинских устройств и программного обеспечения на основе ИИ, оценивая эффективность и безопасность интеграции данных технологий перед их широким применением в клинической практике [78]. Создание чёткой и всеобъемлющей нормативно-правовой базы, специфичной для ИИ в лечении инсульта, необходимо для установления стандартов валидации, тестирования и мониторинга систем ИИ с целью их более эффективного и широкого применения. Кроме того, необходим постоянный мониторинг инструментов ИИ, используемых в лечении инсульта. Ввиду способности ИИ к самообучению необходим контроль по выявлению и устранению возникающих неполадок, что требует сотрудничества между разработчиками, медицинскими работниками и регулирующими органами для создания протоколов отчётности [1, 79, 80].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ИИ является инструментом, способным оказать положительное влияние на реабилитацию пациентов после инсульта, а его интеграция в процесс лечения имеет широкие перспективы, однако сталкивается с рядом трудностей, которые необходимо решить для полной реализации его потенциала. Несмотря на такие проблемы, как неоднородность данных и необходимость междисциплинарного сотрудничества, достижения в области технологий ИИ могут способствовать улучшению результатов реабилитации после инсульта.

Прогностическое моделирование восстановления после инсульта, реабилитация с использованием роботизированных технологий, телереабилитация и анализ изображений — технологии, основанные на ИИ, которые способствуют персонализированному лечению, основанному на прогрессе пациента. Инструменты, основанные на ИИ, могут персонализировать реабилитацию, способствовать нейропластичности и поддерживать регенеративную медицину, способствуя улучшению состояния пациентов. Интеграция ИИ в лечение последствий инсульта представляет собой преобразующий шаг к улучшению оказания медицинской помощи и результатов восстановления пациентов, перенёсших инсульт.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Гриненко Т.Б. — определение концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи, визуализация; Красовская Ж.Д. — определение концепции, написание черновика рукописи; Салимгариева А.А. — пересмотр и редактирование рукописи; Филиппов А.А. — определение концепции, написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи; Хакимов Р.Р. — анализ данных, разработка методологии, определение концепции; Лutfаракhманов И.И. — руководство исследованием, валидация, пересмотр и редактирование рукописи; Кагарманова А.И. — работа с данными, написание черновика рукописи, администрирование проекта; Файзуллина А.Р. — разработка методологии, работа с данными, анализ

данных, написание черновика рукописи; Атласова А.Э. — определение концепции, работа с данными, пересмотр и редактирование рукописи; Мелокян Л.С. — разработка методологии, написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи; Курносых Р.А. — определение концепции, анализ данных; Каримова К.О. — написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи; Уряева Э.П. — написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Не применима.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов (личных, профессиональных или финансовых), связанных с третьими лицами (коммерческими, некоммерческими, частными), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи, а также иных отношений, деятельности и интересов за последние три года, о которых необходимо сообщить.

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

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящей работе, доступны в статье.

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

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: T.B. Grinenko: conceptualization, methodology, writing—original draft, visualization; Zh.D. Krasovskaya: conceptualization, writing—original draft; A.A. Salimgariev: writing—review & editing; A.A. Filippov: conceptualization, writing—original draft, writing—review & editing; R.R. Khakimov: formal analysis, methodology, conceptualization; I.I. Lutfarakhmanov: supervision, validation, writing—review & editing; A.I. Kagarmanova: data curation, writing—original draft, project administration; A.R. Faizullina: methodology, data curation, formal analysis, writing—original draft; A.E. Atlasova: conceptualization, data curation, writing—review & editing; L.S. Melokyan: methodology, writing—original draft, writing—review & editing; R.A. Kurnosykh: conceptualization, formal analysis; K.O. Karimova: writing—original draft, writing—review & editing; E.P. Uryaeva: writing—original draft, writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding source: None

Disclosure of interests: The authors declare no relationships, activities, and interests in the last three years with third parties (commercial and non-commercial) whose interests may be affected by the content of the article.

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

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

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

Provenance and peer-review: This paper was submitted to the journal on an unsolicited basis and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board, and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Islamgulov AK, Zinnatullin RR, Kabataeva AA, et al. Maintaining long-term outcomes after rehabilitation in stroke patients: literature review. *Medical and Social Expert Evaluation and Rehabilitation*. 2025;28(1):25–38. doi: 10.17816/MSER678665 EDN: FQZBJG
2. Franx B, Dijkhuizen RM, Dippel DWJ. Acute Ischemic Stroke in the Clinic and the Laboratory: Targets for Translational Research. *Neuroscience*. 2024;550:114–124. doi: 10.1016/j.neuroscience.2024.04.006
3. Kuznetsov KO, Safina ER, Gaimakova DV, et al. Metformin and malignant neoplasms: a possible mechanism of antitumor action and prospects for use in practice. *Problems of endocrinology*. 2022;68(5):45–55. doi: 10.14341/probl13097 EDN: AGJWVI
4. Feigin VL, Brainin M, Norrving B, et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *Int J Stroke*. 2025;20(2):132–144. doi: 10.1177/17474930241308142
5. Stakhovskaya LV. Analysis of epidemiological indicators of recurrent strokes in the regions of the Russian Federation (based on the results of the territorial-population register 2009–2014). *Consilium medicum*. 2016;18(9):8–11. (In Russ.)
6. Ignatyeva VI, Voznyuk IA, Shamalov NA, et al. Social and economic burden of stroke in Russian Federation. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2023;123(8–2):5–15. doi: 10.17116/jnevro20231230825 EDN: QEIVCM
7. Qin J, Li Y, Cai Z, et al. A metagenome-wide association study of gut microbiota in type 2 diabetes. *Nature*. 2012;490(7418):55–60. doi: 10.1038/nature11450
8. Seidler RD. Neural correlates of motor learning, transfer of learning, and learning to learn. *Exerc Sport Sci Rev*. 2010;38(1):3–9. doi: 10.1097/JES.0b013e3181c5c2e7
9. Tubbs A, Vazquez EA. Engineering and Technological Advancements in Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS): A Five-Year Review. *Brain Sci*. 2024;14(11):1092. doi: 10.3390/brainsci14111092
10. Badawi AS, Mogharbel GH, Aljohani SA, Surrati AM. Predictive Factors and Interventional Modalities of Post-stroke Motor Recovery: An Overview. *Cureus*. 2023;15(3):e35971. doi: 10.7759/cureus.35971
11. Kayola G, Mataa MM, Asukile M, et al. Stroke Rehabilitation in Low- and Middle-Income Countries: Challenges and Opportunities. *Am J Phys Med Rehabil*. 2023;102(2S Suppl 1):S24–S32. doi: 10.1097/PHM.0000000000002128
12. Dresser LP, Kohn MA. Artificial Intelligence and the Evaluation and Treatment of Stroke. *Dela J Public Health*. 2023;9(3):82–84. doi: 10.32481/djph.2023.08.014
13. Jiang L, Zhou L, Yong W, et al. A deep learning-based model for prediction of hemorrhagic transformation after stroke. *Brain Pathol*. 2023;33(2):e13023. doi: 10.1111/bpa.13023
14. Musuka TD, Wilton SB, Traboulsi M, Hill MD. Diagnosis and management of acute ischemic stroke: speed is critical. *CMAJ*. 2015;187(12):887–893. doi: 10.1503/cmaj.140355
15. Islamgulov AK, Bogdanova AS, Sufiiarov DI, et al. Modern capabilities of artificial intelligence technologies in cardiovascular imaging. *Digital Diagnostics*. 2025;6(1):116–129. doi: 10.17816/DD640895
16. Fernandes JND, Cardoso VEM, Comesaña-Campos A, Pinheira A. Comprehensive Review: Machine and Deep Learning in Brain Stroke Diagnosis. *Sensors (Basel)*. 2024;24(13):4355. doi: 10.3390/s24134355
17. Walther J, Kirsch EM, Hellwig L, et al. Reinventing the Penumbra — the Emerging Clockwork of a Multi-modal Mechanistic Paradigm. *Transl Stroke Res*. 2023;14(5):643–666. doi: 10.1007/s12975-022-01090-9
18. Malinova V, Kranawetter B, Tuzi S, Rohde V, Mielke D. Early localization of tissue at risk for delayed cerebral ischemia after aneurysmal subarachnoid hemorrhage: blood distribution on initial imaging vs early CT perfusion. *Neurosurg Rev*. 2024;47(1):223. doi: 10.1007/s10143-024-02457-2
19. Pinto-Coelho L. How Artificial Intelligence Is Shaping Medical Imaging Technology: A Survey of Innovations and Applications. *Bioengineering (Basel)*. 2023;10(12):1435. doi: 10.3390/bioengineering10121435
20. Rehman S, Nadeem A, Akram U, et al. Molecular Mechanisms of Ischemic Stroke: A Review Integrating Clinical Imaging and Therapeutic Perspectives. *Biomedicines*. 2024;12(4):812. doi: 10.3390/biomedicines12040812
21. Boehme AK, Esenwa C, Elkind MS. Stroke Risk Factors, Genetics, and Prevention. *Circ Res*. 2017;120(3):472–495. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.116.308398
22. Hassan M, Awan FM, Naz A, et al. Innovations in Genomics and Big Data Analytics for Personalized Medicine and Health Care: A Review. *Int J Mol Sci*. 2022;23(9):4645. doi: 10.3390/ijms23094645
23. Hochrainer K, Yang W. Stroke Proteomics: From Discovery to Diagnostic and Therapeutic Applications. *Circ Res*. 2022;130(8):1145–1166. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.122.320110
24. Ghaith HS, Nawar AA, Gabra MD, et al. A Literature Review of Traumatic Brain Injury Biomarkers. *Mol Neurobiol*. 2022;59(7):4141–4158. doi: 10.1007/s12035-022-02822-6
25. Ding L, Liu C, Li Z, Wang Y. Incorporating Artificial Intelligence Into Stroke Care and Research. *Stroke*. 2020;51(12):e351–e354. doi: 10.1161/STROKEAHA.120.031295
26. Ahmed Z, Mohamed K, Zeeshan S, Dong X. Artificial intelligence with multi-functional machine learning platform development for better healthcare and precision medicine. *Database (Oxford)*. 2020;2020:baaa010. doi: 10.1093/database/baaa010
27. Gupta NS, Kumar P. Perspective of artificial intelligence in healthcare data management: A journey towards precision medicine. *Comput Biol Med*. 2023;162:107051. doi: 10.1016/j.combiomed.2023.107051
28. Mouridsen K, Thurner P, Zaharchuk G. Artificial Intelligence Applications in Stroke. *Stroke*. 2020;51(8):2573–2579. doi: 10.1161/STROKEAHA.119.027479
29. Mouridsen K, Thurner P, Zaharchuk G. Artificial Intelligence Applications in Stroke. *Stroke*. 2020;51(8):2573–2579. doi: 10.1161/STROKEAHA.119.027479
30. Kim DY, Choi KH, Kim JH, et al. Deep learning-based personalised outcome prediction after acute ischaemic stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2023;94(5):369–378. doi: 10.1136/jnnp-2022-330230
31. Robertshaw H, Karstensen L, Jackson B, et al. Artificial intelligence in the autonomous navigation of endovascular interventions: a systematic review. *Front Hum Neurosci*. 2023;17:1239374. doi: 10.3389/fnhum.2023.1239374
32. Velasco Gonzalez A, Görlich D, Buerke B, et al. Predictors of Successful First-Pass Thrombectomy with a Balloon Guide Catheter: Results of a Decision Tree Analysis. *Transl Stroke Res*. 2020;11(5):900–909. doi: 10.1007/s12975-020-00784-2
33. Vo V, Chen G, Aquino YSJ, Carter SM, Do QN, Woode ME. Multi-stakeholder preferences for the use of artificial intelligence in healthcare: A systematic review and thematic analysis. *Soc Sci Med*. 2023;338:116357. doi: 10.1016/j.socscimed.2023.116357
34. V'elez-Guerrero MA, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Artificial intelligence-based wearable robotic exoskeletons for upper limb rehabilitation: a review. *Sensors*. 2021;21:2146. doi: 10.3390/s21062146
35. Sivić C, Baker LM, Quinlivan BT, et al. Opportunities and challenges in the development of exoskeletons for locomotor assistance. *Nat Biomed Eng*. 2023;7(4):456–472. doi: 10.1038/s41551-022-00984-1
36. du Plessis T, Djuani K, Oosthuizen C. A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance. *Robotics*. 2021;10:40. doi: 10.3390/robotics10010040

37. Duan J, Zhang K, Qian K, et al. An Operating Stiffness Controller for the Medical Continuum Robot Based on Impedance Control. *Cyborg Bionic Syst.* 2024;5:0110. doi: 10.34133/cbsystems.0110
38. Xiong J, Wang JT, Lin S, Xie BY. Advances in hemiplegia rehabilitation: modern therapeutic interventions to enhance activities of daily living. *Front Neurol.* 2025;16:1555990. doi: 10.3389/fneur.2025.1555990
39. Swarnakar R, Yadav SL. Artificial intelligence and machine learning in motor recovery: A rehabilitation medicine perspective. *World J Clin Cases.* 2023;11(29):7258–7260. doi: 10.12998/wjcc.v11.i29.7258
40. Vélez-Guerrero MA, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Artificial Intelligence-Based Wearable Robotic Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation: A Review. *Sensors (Basel).* 2021;21(6):2146. doi: 10.3390/s21062146
41. Aldhahi MI, Alorainy AI, Abuzaid MM, et al. Adoption of Artificial Intelligence in Rehabilitation: Perceptions, Knowledge, and Challenges Among Healthcare Providers. *Healthcare (Basel).* 2025;13(4):350. doi: 10.3390/healthcare13040350
42. Rasa AR. Artificial Intelligence and Its Revolutionary Role in Physical and Mental Rehabilitation: A Review of Recent Advancements. *Biomed Res Int.* 2024;2024:9554590. doi: 10.1155/bmri/9554590
43. Sijobert B, Feuvrier F, Froger J, Guiraud D, Coste CA. A sensor fusion approach for inertial sensors based 3D kinematics and pathological gait assessments: toward an adaptive control of stimulation in post-stroke subjects. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2018;2018:3497–3500. doi: 10.1109/EMBC.2018.8512985
44. González-Graniel E, Mercado-Gutierrez JA, Martínez-Díaz S, et al. Sensing and Control Strategies Used in FES Systems Aimed at Assistance and Rehabilitation of Foot Drop: A Systematic Literature Review. *J Pers Med.* 2024;14(8):874. doi: 10.3390/jpm14080874
45. Khoo IH, Marayong P, Krishnan V, et al. Real-time biofeedback device for gait rehabilitation of post-stroke patients. *Biomed Eng Lett.* 2017;7(4):287–298. doi: 10.1007/s13534-017-0036-1
46. Porciuncula F, Roto AV, Kumar D, et al. Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances. *PM R.* 2018;10(9 Suppl 2):S220–S232. doi: 10.1016/j.pmrj.2018.06.013
47. Lanotte F, O'Brien MK, Jayaraman A. AI in Rehabilitation Medicine: Opportunities and Challenges. *Ann Rehabil Med.* 2023;47(6):444–458. doi: 10.5535/arm.23131
48. Kashezhev AG, Lutokhin GM, Rassulova MA, et al. Virtual reality technology in medical rehabilitation of patients with ischemic stroke. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2022;99(6):50–55. doi: 10.17116/kurort20229906150
49. Said RR, Heyat MBB, Song K, Tian C, Wu Z. A Systematic Review of Virtual Reality and Robot Therapy as Recent Rehabilitation Technologies Using EEG-Brain-Computer Interface Based on Movement-Related Cortical Potentials. *Biosensors (Basel).* 2022;12(12):1134. doi: 10.3390/bios12121134
50. Bateni H, Carruthers J, Mohan R, Pishva S. Use of Virtual Reality in Physical Therapy as an Intervention and Diagnostic Tool. *Rehabil Res Pract.* 2024;2024:1122286. doi: 10.1155/2024/1122286
51. Alashram AR. Combined robot-assisted therapy virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke survivors: a systematic review of randomized controlled trials. *Neural Sci.* 2024;45(11):5141–5155. doi: 10.1007/s10072-024-07628-z
52. Soleimani M, Ghazisaedi M, Heydari S. The efficacy of virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *BMC Med Inform Decis Mak.* 2024;24(1):135. doi: 10.1186/s12911-024-02534-y
53. Berger DJ, d'Avella A. Myoelectric control and virtual reality to enhance motor rehabilitation after stroke. *Front Bioeng Biotechnol.* 2024;12:1376000. doi: 10.3389/fbioe.2024.1376000
54. Ehioghae M, Montoya A, Keshav R, et al. Effectiveness of Virtual Reality-Based Rehabilitation Interventions in Improving Postoperative Outcomes for Orthopedic Surgery Patients. *Curr Pain Headache Rep.* 2024;28(1):37–45. doi: 10.1007/s11916-023-01192-5
55. Kotelnikova AV, Kukshina AA, Nikishin II, Turova EA. Adherence to treatment as a factor in increasing the effectiveness of psychological rehabilitation programs for stroke patients using augmented reality technology. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2020;97(5):31–38. doi: 10.17116/kurort20209705131 EDN: QCHSJR
56. Khokale R, Mathew GS, Ahmed S, et al. Virtual and Augmented Reality in Post-stroke Rehabilitation: A Narrative Review. *Cureus.* 2023;15(4):e37559. doi: 10.7759/cureus.37559
57. Majil I, Yang MT, Yang S. Augmented Reality Based Interactive Cooking Guide. *Sensors (Basel).* 2022;22(21):8290. doi: 10.3390/s22218290
58. Farmer N, Touchton-Leonard K, Ross A. Psychosocial Benefits of Cooking Interventions: A Systematic Review. *Health Educ Behav.* 2018;45(2):167–180. doi: 10.1177/1090198117736352
59. Lee HS, Lim JH, Jeon BH, Song CS. Non-immersive Virtual Reality Rehabilitation Applied to a Task-oriented Approach for Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *Restor Neural Neurosci.* 2020;38(2):165–172. doi: 10.3233/RNN-190975
60. Demeco A, Zola L, Frizziero A, et al. Immersive Virtual Reality in Post-Stroke Rehabilitation: A Systematic Review. *Sensors (Basel).* 2023;23(3):1712. doi: 10.3390/s23031712
61. Yeung AWK, Tosevska A, Klager E, et al. Virtual and Augmented Reality Applications in Medicine: Analysis of the Scientific Literature. *J Med Internet Res.* 2021;23(2):e25499. doi: 10.2196/25499
62. Apochi OO, Olusanya MD, Wesley M, et al. Virtual, mixed, and augmented realities: A commentary on their significance in cognitive neuroscience and neuropsychology. *Appl Neuropsychol Adult.* 2024:1–4. doi: 10.1080/23279095.2024.2365870
63. Lanotte F, O'Brien MK, Jayaraman A. AI in Rehabilitation Medicine: Opportunities and Challenges. *Ann Rehabil Med.* 2023;47(6):444–458. doi: 10.5535/arm.23131
64. Islamgulov AK, Pervakov MV, Fominova OO, et al. The role of rehabilitation aimed at improving bone function in cancer patients with bone tissue damage. *Medical and Social Expert Evaluation and Rehabilitation.* 2024;27(3):163–176. doi: 10.17816/MSER646532 EDN: WAYMJO
65. Pereira MF, Prahm C, Kolbenschlag J, Oliveira E, Rodrigues NF. Application of AR and VR in hand rehabilitation: A systematic review. *J Biomed Inform.* 2020;111:103584. doi: 10.1016/j.jbi.2020.103584
66. Maleki Varnosfaderani S, Forouzanfar M. The Role of AI in Hospitals and Clinics: Transforming Healthcare in the 21st Century. *Bioengineering (Basel).* 2024;11(4):337. doi: 10.3390/bioengineering11040337
67. Alashev AM, Hubert GJ, Santo GC, et al. Recommendations on telestroke in Europe. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2020;120(3–2):33–41. doi: 10.17116/jnevro202012003233 EDN: CIIXXC
68. Al-Kahtani MS, Khan F, Taekeun W. Application of Internet of Things and Sensors in Healthcare. *Sensors (Basel).* 2022;22(15):5738. doi: 10.3390/s22155738
69. Abdulmalek S, Nasir A, Jabbar WA, et al. IoT-Based Healthcare-Monitoring System towards Improving Quality of Life: A Review. *Healthcare (Basel).* 2022;10(10):1993. doi: 10.3390/healthcare10101993
70. Abedi A, Colella TJF, Pakosh M, Khan SS. Artificial intelligence-driven virtual rehabilitation for people living in the community: A scoping review. *NPJ Digit Med.* 2024;7(1):25. doi: 10.1038/s41746-024-00998-w
71. Rezapour M, Seymour RB, Sims SH, et al. Employing machine learning to enhance fracture recovery insights through gait analysis. *J Orthop Res.* 2024;42(8):1748–1761. doi: 10.1002/jor.25837
72. Haleem A, Javadi M, Singh RP, Suman R. Telemedicine for healthcare: Capabilities, features, barriers, and applications. *Sens Int.* 2021;2:100117. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100117
73. Kepper MM, Gierbolini-Rivera RD, Weaver KE, et al. Multilevel factors influence the use of a cardiovascular disease assessment tool embedded in the electronic health record in oncology care. *Transl Behav Med.* 2025;15(1):ibae058. doi:10.1093/tbm/ibae058
74. El Arab RA, Abu-Mahfouz MS, Abuadas FH, et al. Bridging the Gap: From AI Success in Clinical Trials to Real-World Healthcare Implementation-A Narrative Review. *Healthcare (Basel).* 2025;13(7):701. doi: 10.3390/healthcare13070701
75. Santos P, Nazaré I. The doctor and patient of tomorrow: exploring the intersection of artificial intelligence, preventive medicine, and ethical challenges in future healthcare. *Front Digit Health.* 2025;7:1588479. doi: 10.3389/fdgh.2025.1588479

- 76.** Jeyaraman M, Balaji S, Jeyaraman N, Yadav S. Unraveling the Ethical Enigma: Artificial Intelligence in Healthcare. *Cureus*. 2023;15(8):e43262. doi: 10.7759/cureus.43262
- 77.** Grzybowski A, Jin K, Wu H. Challenges of artificial intelligence in medicine and dermatology. *Clin Dermatol*. 2024;42(3):210–215. doi: 10.1016/j.clindermatol.2023.12.013
- 78.** Derraz B, Breda G, Kaempf C, et al. New regulatory thinking is needed for AI-based personalised drug and cell therapies in precision oncology. *NPJ Precis Oncol*. 2024;8(1):23. doi: 10.1038/s41698-024-00517-w

ОБ АВТОРАХ

*** Гриненко Татьяна Борисовна;**

адрес: Россия, 197022, Санкт-Петербург,
ул. Льва Толстого, д. 6–8;
ORCID: 0009-0004-5213-3689;
e-mail: gr1nencko.tat@yandex.ru

Красовская Жанна Дмитриевна;

ORCID: 0009-0003-3851-6766;
e-mail: jankinkra@gmail.com

Салимгариева Анна Алексеевна;

ORCID: 0009-0000-5320-3168;
e-mail: desenko@yandex.ru

Филиппов Артём Андреевич;

ORCID: 0009-0005-3830-8312;
e-mail: artem14090@yandex.ru

Хакимов Рияз Рамисович;

ORCID: 0009-0006-9480-668X;
e-mail: piranya200@gmail.com

Лутфаррахманов Ильдар Ильдусович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-5829-5054;
eLibrary SPIN: 8047-1348;
e-mail: lutfarahmanov@yandex.ru

Кагарманова Альфиза Ильмировна;

ORCID: 0009-0000-5876-9603;
e-mail: a.sun06072@gmail.com

Файзуллина Айгуль Рафисовна;

ORCID: 0009-0008-5126-6024;
e-mail: cwosl@mail.ru

Атласова Азалия Эмилевна;

ORCID: 0009-0003-7807-8203;
e-mail: atlazalia1@gmail.com

Мелокийн Лиана Сергеевна;

e-mail: melokyanliana@mail.ru

Курносых Руслан Александрович;

ORCID: 0009-0005-2377-9453;
e-mail: bchemadicted@gmail.com

Каримова Ксения Олеговна;

ORCID: 0009-0006-7048-0937;
e-mail: kstepanov1@yandex.ru

Уряева Эльвира Петровна;

ORCID: 0009-0006-8960-7897;
e-mail: uryeva@bk.ru

- 79.** Brady AP, Allen B, Chong J, et al. Developing, purchasing, implementing and monitoring AI tools in radiology: Practical considerations. A multi-society statement from the ACR, CAR, ESR, RANZCR & RSNA. *J Med Imaging Radiat Oncol*. 2024;68(1):7–26. doi: 10.1111/1754-9485.13612

- 80.** Brady AP, Allen B, Chong J, et al. Developing, Purchasing, Implementing and Monitoring AI Tools in Radiology: Practical Considerations. A Multi-Society Statement From the ACR, CAR, ESR, RANZCR & RSNA. *J Am Coll Radiol*. 2024;21(8):1292–1310. doi: 10.1016/j.jacr.2023.12.005

AUTHORS' INFO

*** Tatyana B. Grinenko;**

address: 6–8 Lev Tolstoy st, Saint Petersburg,
Russia, 197022;
ORCID: 0009-0004-5213-3689;
e-mail: gr1nencko.tat@yandex.ru

Zhanna D. Krasovskaya;

ORCID: 0009-0003-3851-6766;
e-mail: jankinkra@gmail.com

Anna A. Salimgariev;

ORCID: 0009-0000-5320-3168;
e-mail: desenko@yandex.ru

Artem A. Filippov;

ORCID: 0009-0005-3830-8312;
e-mail: artem14090@yandex.ru

Riyaz R. Khakimov;

ORCID: 0009-0006-9480-668X;
e-mail: piranya200@gmail.com

Ildar I. Lutfarakhmanov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-5829-5054;
eLibrary SPIN: 8047-1348;
e-mail: lutfarahmanov@yandex.ru

Alfiza I. Kagarmanova;

ORCID: 0009-0000-5876-9603;
e-mail: a.sun06072@gmail.com

Aigul R. Faizullina;

ORCID: 0009-0008-5126-6024;
e-mail: cwosl@mail.ru

Azaliya E. Atlasova;

ORCID: 0009-0003-7807-8203;
e-mail: atlazalia1@gmail.com

Liana S. Melokyan;

e-mail: melokyanliana@mail.ru

Ruslan A. Kurnosykh;

ORCID: 0009-0005-2377-9453;
e-mail: bchemadicted@gmail.com

Ksenia O. Karimova;

ORCID: 0009-0006-7048-0937;
e-mail: kstepanov1@yandex.ru

Elvira P. Uryaeva;

ORCID: 0009-0006-8960-7897;
e-mail: uryeva@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author