

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ АТЛАС ЗОН КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ ВНУТРЕННЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ

И.Л. Губский^{1, 2}, Д.Д. Наместникова^{1, 2}, Э.А. Черкашова^{1, 2}, И.С. Гумин¹, Л.В. Губский^{1, 2}, В.П. Баклаушев^{1, 2}, В.П. Чехонин^{2, 3}, К.Н. Ярыгин^{4, 5}

¹ Федеральный центр мозга и нейротехнологий, Москва, Россия;

² Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;

³ Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии имени В.П. Сербского, Москва, Россия;

⁴ Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича, Москва, Россия;

⁵ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Создание нейроанатомического атласа на большой выборке данных является, по сути, фундаментальным трудом, но создание цифрового атласа в эпоху широкого применения методов лучевой диагностики в клинической и экспериментальной практике, а также систем искусственного интеллекта придаёт исследованию значимое прикладное значение. Крысы являются основным видом лабораторных животных, на которых происходят исследования по моделированию ишемического инсульта, тестированию церебропротекторных препаратов и разработке новых стратегий регенеративной терапии последствий инсульта. На данный момент не существует полноценного цифрового атласа артериального кровоснабжения мозга крыс, а единичные работы опираются на небольшие группы животных и их гистологическое описание. В связи с этим представляется крайне интересным и важным сделать первый шаг для освещения данной проблемы. **Цель исследования** — создать атлас зон кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии в условиях экспериментальной окклюзии средней мозговой артерии. **Методы.** Архивные данные магнитно-резонансных исследований крыс с моделью транзиторной окклюзии средней мозговой артерии монофиламентом ($n=243$). Систему автоматической сегментации мозга на основе искусственного интеллекта использовали для объективной разметки области инфаркта мозга, полученные данные приводили в общее координатное пространство, объединяли и анализировали для выделения зон артериального кровоснабжения. **Результаты.** Создан цифровой атлас артериального кровоснабжения на основании прижизненных данных магнитно-резонансной томографии высокого разрешения с изотропным вокселем. **Заключение.** Созданный атлас может применяться для повышения качества моделирования инфаркта мозга путём транзиторной окклюзии средней мозговой артерии монофиламентом и позволит использовать в оценке эффектов терапии экспериментального ишемического инсульта дополнительные объективные параметры. Разработанная нами методология применима для высокопроизводительного ретроспективного анализа данных нейровизуализации пациентов с ишемическим инсультом, полученных в рамках реализации сосудистой программы в Российской Федерации.

Ключевые слова: ишемический инсульт; крысы; кровоснабжение; магнитно-резонансная томография; искусственный интеллект.

Для цитирования:

Губский И.Л., Наместникова Д.Д., Черкашова Э.А., Гумин И.С., Губский Л.В., Баклаушев В.П., Чехонин В.П., Ярыгин К.Н. Экспериментальный цифровой атлас зон кровоснабжения ветвей внутренней сонной артерии. *Клиническая практика*. 2025;16(1):30–37.

doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract642757>

Поступила 10.12.2024

Принята 12.03.2025

Опубликована online 12.03.2025

EXPERIMENTAL DIGITAL ATLAS OF BLOOD SUPPLY ZONES OF THE INTERNAL CAROTID ARTERY

I.L. Gubskiy^{1,2}, D.D. Namestnikova^{1,2}, E.A. Cherkashova^{1,2}, I.S. Gumin¹, L.V. Gubsky^{1,2}, V.P. Baklaushev^{1,2}, V.P. Chekhonin^{2,3}, K.N. Yarygin^{4,5}

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

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

³ V. Serbsky National Medical Research Centre of Psychiatry and Narcology, Moscow, Russia;

⁴ Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, Russia;

⁵ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The compilation of a neuroanatomic atlas based on a large sample is essentially a fundamental research work, but compiling a digital atlas during the epoch of wide usage of radiodiagnostics methods in the clinical and experimental practice along with using the artificial intelligence systems brings a significant applied relevance to the research. Rats are the main species of laboratory animals, in which the studies of modeling the ischemic stroke, of testing the cerebroprotective drugs and of developing new strategies of regenerative therapy of stroke consequences are carried out. At the present moment, there is no available and comprehensive digital atlas of the arterial blood supply of the rat brain, while single research works are based on small groups of animals and their histological description. Within this context, it is deemed very interesting and important to take the first step in addressing this issue. **AIM:** to compile an atlas of blood supply zones within the intracranial branches of the internal carotid artery in the settings of experimentally induced occlusion of the medial cerebral artery. **METHODS:** The archived data were used from the magnetic resonance imaging scans in rats with modeling the transient occlusion of the medial cerebral artery with a monofilament (n=243). The system of automatic brain segmentation based on artificial intelligence was used for objective mapping of the cerebral infarction area, the obtained data were added to a single coordinate space, unified and analyzed for highlighting the arterial blood supply zones. **RESULTS:** A digital atlas of the arterial circulation was compiled based on the intravital data of high-resolution magnetic resonance imaging with an isotropic voxel. **CONCLUSION:** The compiled atlas may be used for increasing the quality of modeling the cerebral infarction by means of transient occlusion of the medial cerebral artery with a monofilament and it allows for using the additional objective parameters in the evaluation of the treatment effects in cases of experimentally induced ischemic stroke. The methodology developed by us is applicable for high-performance retrospective analysis of the neurovisualization data from the ischemic stroke patients, obtained within a framework of the implementation of the Vascular Medicine Program in the Russian Federation.

Keywords: ischemic stroke; rats; blood supply; Magnetic resonance imaging; artificial intelligence.

For citation:

Gubskiy IL, Namestnikova DD, Cherkashova EA, Gumin IS, Gubsky LV, Baklaushev VP, Chekhonin VP, Yarygin KN. Experimental digital atlas of blood supply zones of the internal carotid artery. *Journal of Clinical Practice*. 2025;16(1):30–37. doi: <https://doi.org/10.17816/clinpract642757>

Submitted 10.12.2024

Accepted 12.03.2025

Published online 12.03.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Для решения современных научных задач исследователям приходится всё глубже осваивать и применять новые методы обработки и анализа

данных [1]. Технический прогресс ускоряется, что способствует развитию прикладных исследований, однако отмечается снижение внимания к фундаментальной науке [2]. Данная статья посвящена

изучению распределения зон артериального кровоснабжения в мозге крыс, которые уже более 150 лет остаются, пожалуй, самыми популярными лабораторными животными для моделирования заболеваний в экспериментальных биомедицинских исследованиях [3]. Экспериментальная модель ишемического инсульта, основанная на транзиторной окклюзии средней мозговой артерии с использованием монофиламента, максимально точно воспроизводит патогенетические процессы, происходящие при развитии двух самых частых вариантов ишемического инсульта — атеротромботического и кардиоэмболического инсульта с феноменом реперфузии [4, 5]. Несмотря на высокую популярность данной модели, до настоящего времени отсутствует цифровой атлас зон артериального кровоснабжения в высоком разрешении, который мог бы быть интегрирован в современные методы автоматической обработки данных лучевой визуализации. Существующие описания небольших серий магнитно-резонансных [6] и гистологических исследований, посвящённых этому вопросу [7, 8], не привели к созданию данного инструмента.

Внедрение систем искусственного интеллекта в трансляционные исследования ишемического инсульта [9–11] делает эту задачу ещё более актуальной. Обусловлено это прежде всего тем, что подобные системы, включая системы морфометрического анализа, сегментации очагов поражения вещества головного мозга с учётом анатомической привязки и другие, на определённом этапе функционирования требуют использования цифрового атласа, который служит основой для проведения анализа. Одним из преимуществ методов прижизненной визуализации мозга у экспериментальных животных является возможность сократить размер выборки и получить объективные данные об анатомии без необходимости их эвтаназии. Магнитно-резонансная томография (МРТ) как один из таких методов [12] позволяет накопить объём цифровых данных, необходимых для создания подобного атласа.

Цель исследования — создать цифровой атлас зон кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии в условиях экспериментальной окклюзии средней мозговой артерии.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Данное исследование является одноцентровым экспериментальным ретроспективным (все

данные, используемые в работе, были получены в рамках выполнения других экспериментальных работ).

Критерии соответствия

Критерии включения. В работу включены ретроспективные данные магнитно-резонансных исследований головного мозга крыс с моделью острой фокальной ишемии и наличием в протоколе изотропных T2-взвешенных изображений.

Критерии исключения. Критериями исключения при оценке архивных данных было отсутствие очага инфаркта мозга по данным МРТ и отсутствие необходимой импульсной последовательности в протоколе сканирования.

Условия проведения

Архивные данные МРТ экспериментальных животных были получены на крысах линии Вистар в Центре коллективного пользования «Медицинские нанобиотехнологии» ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Минздрава России (РНИМУ им. Н.И. Пирогова). В рамках получения этих данных в предыдущих экспериментах животных содержали в стандартных условиях (12-часовой световой режим, $22 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность 45–65%) по 4–5 особей в клетке до и по одной после моделирования ишемического инсульта при свободном доступе к воде и стандартному корму. Все оперативные вмешательства и МРТ проводили под общим ингаляционным наркозом, который обеспечивался системой анестезии животных (E-Z-7000 Classic System; E-Z-Anesthesia Systems). Для индукции наркоза применялся 3,5–4% изофлуран (Aerrane, Baxter HealthCare Corporation), для поддержания анестезии — 2–2,5% изофлуран. При моделировании экспериментального инфаркта мозга применялась смесь анестетика с атмосферным воздухом, а при проведении МРТ — с чистым кислородом. Во время всех оперативных вмешательств и при проведении МРТ поддерживалась температура тела животных 37°C . В конце срока наблюдения животных подвергали эвтаназии с использованием индукционной камеры (E-Z-7000 Classic System; E-Z Anesthesia Systems) и ингаляционного наркоза непосредственно перед транскардиальной перфузией животным вводили летальную дозу золетила. Все результаты экспериментов на

животных изложены в соответствии рекомендациям ARRIVE.

Продолжительность исследования

Ретроспективный анализ архивных данных включал период работы научного коллектива с 2017 по 2024 год.

Описание исследования

Для создания атласа бассейна кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии использовали архивные данные МРТ экспериментальных животных с моделью временной окклюзии средней мозговой артерии монофиламентом.

Инфаркт мозга в рамках других научных исследований коллектива авторов моделировался путём транзиторной (90 минут) окклюзии правой средней мозговой артерии монофиламентом, заведённым через наружную сонную артерию во внутреннюю сонную артерию [13]. Монофиламент имеет силиконовый наконечник длиной 4 мм и диаметром 0,37 мм (монофиламент 4-0, Doccol Corporation), вследствие чего в зависимости от глубины его расположения возможна остановка кровообращения по артериям, расположенным рядом с отхождением средней мозговой артерии.

В качестве объективного контроля очага инфаркта мозга у всех животных выполняли МР-исследование на томографе для малых лабораторных животных ClinScan (Bruker BioSpin) с индукцией магнитного поля 7 Тл.

Статистический анализ

Для наиболее объективной сегментации очага инфаркта мозга применялся заранее обученный программный алгоритм с помощью системы искусственного интеллекта. Данная система создана на основе трансформера Swin-UNETR [14] как одной из самых современных архитектур нейронных сетей, демонстрирующей высокое качество при сегментации медицинских данных лучевых методов диагностики. Вся обработка данных производилась с использованием языка программирования Python [15]. Полученные данные сегментации инфаркта мозга приводились в одно координатное пространство путём использования пакета SimpleITK [16] и заранее подготовленного шаблона мозга крысы (регистровались к шаблону). Затем все данные сегментации объединялись и анализировались с использованием программного пакета 3D Slicer [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В работу включено 243 архивных исследования, в которых получены изотропные T2-взвешенные изображения (с использованием импульсной последовательности трёхмерного быстрого спинного эха с изменяющимся углом возбуждения SPACE, размером вокселя 0,2×0,2×0,2 мм, временем повторения и временем эхо-сигнала 4000 и 251 мс соответственно).

Основные результаты исследования

Для создания атласа бассейнов кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии по данным МРТ использовалась система искусственного интеллекта, позволяющая достоверно сегментировать зону инфаркта мозга после окклюзии средней мозговой артерии (рис. 1). Полученные результаты сегментации экспериментального инфаркта мозга регистрировали в одно координатное пространство с использованием шаблона мозга крысы (рис. 2, а). На основании полученных файлов сегментации, суммированных в одной координатной системе, были созданы тепловые карты частоты формирования очага инфаркта мозга (см. рис. 2, b).

Поиск зон кровоснабжения основных интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии (субкортикальной и кортикальной области средней

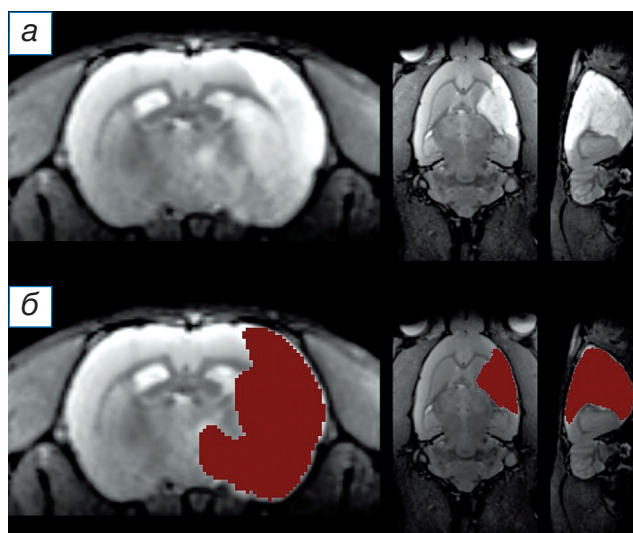


Рис. 1. Пример сегментации инфаркта мозга с использованием искусственного интеллекта: а — T2-взвешенные изображения в аксиальной, фронтальной и сагиттальной плоскостях (слева направо), на которых в правом полушарии визуализируется гиперинтенсивный очаг инфаркта мозга; б — автоматическая сегментация очага инфаркта мозга (обозначена красным цветом).

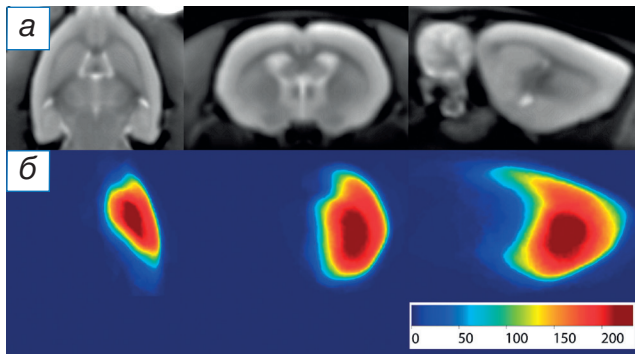


Рис. 2. Частота расположения очага инфаркта мозга у экспериментальных животных с моделью временной окклюзии правой средней мозговой артерии (получена путём суммирования всех очагов инфаркта мозга в одном координатном пространстве): а — шаблон интактного мозга, к которому производилась регистрация данных (приведён для ориентира); б — частота расположения очага инфаркта мозга: чем теплее цвет, тем чаще поражалась данная часть мозга (приведена цветовая шкала с указанием соответствия цвета и количества усреднённых значений).

мозговой артерии, передней ворсинчатой артерии и гипоталамических артерий) производился в несколько этапов. В соответствии с последовательностью отхождения артерий от внутренней сонной

артерии филамент, установленный в её просвете, может вызывать окклюзию её различных ветвей (рис. 3, а). Зная последовательность отхождения артерий, можно выделить животных, у которых при глубоком положении филамента не наблюдается очага инфаркта в бассейне проксимальных ветвей внутренней сонной артерии, а также животных с недостаточно глубоким положением филамента, у которых в очаг инфаркта не вовлекаются дистальные ветви внутренней сонной артерии (см. рис. 3, а).

Первый этап создания атласа заключался в генерации тепловых карт частоты формирования очага в зависимости от объёма инфаркта мозга: 0–25 мм³, 0–50 мм³, 0–75 мм³, 0–100 мм³, 0–200 мм³, 0–300 мм³, 25–75 мм³, 50–150 мм³, 100–200 мм³, 200–300 мм³, 300–500 мм³, 200–500 мм³, 150 мм³ и более. Полученные тепловые карты визуально анализировали и с использованием метода Оцу; производилась первичная сегментация интересующих нас областей. На втором этапе производилась автоматическая фильтрация по включению и/или исключению в суммирующую тепловую карту исследований, где присутствовали и/или отсутствовали отобранные на первом этапе ре-

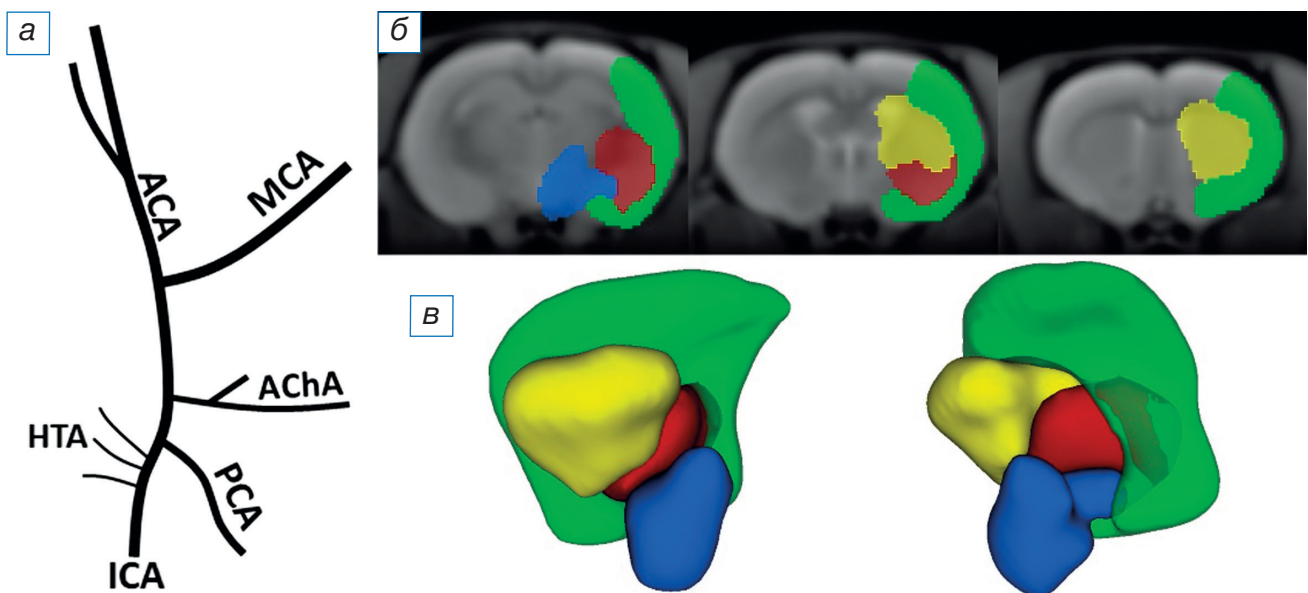


Рис. 3. Схема отхождения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии и созданный атлас зон их кровоснабжения: а — схема отхождения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии (схема создана на основании данных Z. Не и соавт. [7]); б — последовательные срезы в аксиальной плоскости с расположением на них зон кровоснабжения (зелёным цветом обозначен бассейн корковых ветвей средней мозговой артерии, жёлтым — бассейн средней мозговой артерии, питающий субкортикальную область, красным — бассейн передней ворсинчатой артерии, синим — бассейн гипоталамических артерий); в — трёхмерная реконструкция атласа зон кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии (обозначения цветом аналогичны пункту «б»). ICA — внутренняя сонная артерия; PCA — задняя мозговая артерия; MCA — средняя мозговая артерия; AChA — передняя ворсинчатая артерия; HTA — гипоталамические артерии.

ференсные точки в области очага инфаркта мозга: всего было отобрано пять таких комбинаций. Полученные тепловые карты анализировались в дополнение к полученным на первом этапе, и производилась их разметка с перекрытием областей кровоснабжения выбранных ветвей внутренней сонной артерии. На заключительном этапе выполнялось сглаживание контуров с поиском оптимальных границ между бассейнами кровоснабжения для нивелирования областей перекрытия.

Полученный атлас зон кровоснабжения основных интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии представлен на рис. 3 (б), его трёхмерная реконструкция — на рис. 3 (в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Созданный нами цифровой атлас зон кровоснабжения основных интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии может быть использован для объективной и количественной оценки частоты формирования различных типов инфаркта мозга (полушарный, подкорковый, с поражением гипоталамуса) на модели транзиторной окклюзии средней мозговой артерии. На основании этих данных возможно осуществить подборку параметров филамента (длину силиконового наконечника, его диаметр), а также прогнозировать возможные осложнения, например гипертермию при поражении гипоталамуса [18]. Достоинством данной работы является то, что впервые создан атлас кровоснабжения на большом (более 200 исследований) объёме данных, полученных неинвазивным способом с высоким пространственным разрешением у крыс (использовался изотропный воксель $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ мм). В большинстве существующих работ для оценки зон кровоснабжения применялась либо *ex vivo* гистологическая окраска мозга на ишемию [7, 8], либо МРТ с анизотропными срезами на малой выборке данных, без создания атласа кровоснабжения [6]. Существуют также подробные атласы по зонам кровоснабжения у мышей [19, 20], созданные на единичных экспериментальных животных, вследствие чего слабо отражающие вариативность их расположения.

Следует отметить, что предложенный подход к созданию атласа зон артериального кровоснабжения, основанный на анализе экспериментальных данных, представленных в данной работе, обладает потенциалом для адаптации

и применения в клинической практике. За период реализации сосудистой программы в Российской Федерации накоплен значительный объём данных нейровизуализации пациентов с ишемическим инсультом. Их ретроспективный анализ с учётом демографических и клинических характеристик на основании разработанной нами методологии может способствовать получению новых фундаментальных знаний в области сосудистой неврологии.

Ограничения исследования

Основным недостатком данной работы является создание атласа только для зон кровоснабжения интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии справа. Однако модель транзиторной окклюзии средней мозговой артерии монофиламентом является золотым стандартом и самой распространённой моделью в трансляционных доклинических исследованиях ишемического инсульта как наиболее близкой по патофизиологии [21–23]. Ограничение по стороне оценки может быть также нивелировано на этапе регистрации данных путём их отражения. Возможным недостатком является и применение специализированного протокола (изотропные T2-взвешенные изображения с помощью импульсной последовательности трёхмерного быстрого спинного эха с изменяющимся углом возбуждения) на этапе создания атласа, однако сам атлас может быть использован вне контекста работы с искусственным интеллектом, и его регистрация возможна на любые T2-взвешенные изображения, в том числе анизотропные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на основании выборки более чем 200 прижизненных МР-исследований с высоким разрешением создан цифровой атлас зон кровоснабжения основных интракраниальных ветвей внутренней сонной артерии. Данный атлас применим в рамках трансляционных исследований на наиболее релевантной экспериментальной модели ишемического инсульта — транзиторной окклюзии средней мозговой артерии монофиламентом. Разработанная нами методология применима для высокопроизводительного ретроспективного анализа данных нейровизуализации пациентов с ишемическим инсультом, полученных в рамках реализации сосудистой программы в Российской Федерации.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. И.Л. Губский, Д.Д. Наместникова, Э.А. Черкашова, И.С. Гумин — подготовка и анализ данных, написание программного кода, написание текста статьи; И.Л. Губский, Л.В. Губский, В.П. Баклаушев, В.П. Чехонин, К.Н. Ярыгин — разработка концепции, предоставление ресурсов, редактирование рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Этическая экспертиза. Данная работа выполнена на архивном наборе данных, получение которых в рамках выполнения научной работы коллектива авторов одобрено этическим комитетом РНИМУ им. Н.И. Пирогова (протокол № 22/2023 от 15.12.2023), и в соответствии с Директивой 2010/63/EU Европейского парламента и Совета ЕС по защите животных, используемых в научных целях.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 23-25-00300). Часть работы по анализу данных тепловых карт выполнена на оборудовании и при финансовой поддержке ФМБА России.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. I.L. Gubskiy, D.D. Namestnikova, E.A. Cherkashova, I.S. Gumin — data preparation and analysis, writing program code, writing article text; I.L. Gubskiy, L.V. Gubsky, V.P. Baklaushev, V.P. Chekhonin, K.N. Yarygin — concept development, resource provision, text editing. The authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval. This work was performed on an archival data set, the acquisition of which as part of the scientific work of the authors' team was approved by the Ethics Committee of the Pirogov Russian National Research Medical University (protocol No. 22/2023 dated 15.12.2023), and in accordance with Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the

Council of the EU on the protection of animals used for scientific purposes.

Funding source. This work was supported by the Research Foundation Flanders (grant 23-25-00300). Part of the work on the analysis of heat map data was performed on equipment and with financial support from the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Srivastava N, Verma S, Singh A, et al. Advances in artificial intelligence-based technologies for increasing the quality of medical products. *Daru*. 2024;33(1):1. doi: 10.1007/s40199-024-00548-5 EDN: ZRACJW
2. Fajardo-Ortiz D, Thijs B, Glanzel W, Sipido KR. Evolution of funding for collaborative health research towards higher-level patient-oriented research. A comparison of the European Union Framework Programmes to the program funding by the United States National Institutes of Health. 2023. 37 p. doi: 10.48550/arXiv.2308.07162
3. Smith JR, Bolton ER, Dwinell MR. The rat: A model used in biomedical research. *Methods Mol Biol*. 2019;2018:1–41. doi: 10.1007/978-1-4939-9581-3_1 EDN: ZYKRSG
4. Li Y, Tan L, Yang C, et al. Distinctions between the Koizumi and Zea Longa methods for middle cerebral artery occlusion (MCAO) model: A systematic review and meta-analysis of rodent data. *Sci Rep*. 2023;13(1):10247. doi: 10.1038/s41598-023-37187-w EDN: LRWMGN
5. Li Y, Zhang J. Animal models of stroke. *Animal Model Exp Med*. 2021;4(3):204–219. doi: 10.1002/AME2.12179
6. Gerriets T, Stolz E, Walberer M, et al. Complications and pitfalls in rat stroke models for middle cerebral artery occlusion: A comparison between the suture and the macrosphere model using magnetic resonance angiography. *Stroke*. 2004;35(10):2372–2377. doi: 10.1161/01.STR.0000142134.37512.a7
7. He Z, Yang SH, Naritomi H, et al. Definition of the anterior choroidal artery territory in rats using intraluminal occluding technique. *J Neurol Sci*. 2000;182(1):16–28. doi: 10.1016/S0022-510X(00)00434-2
8. Guan Y, Wang Y, Yuan F, et al. Effect of suture properties on stability of middle cerebral artery occlusion evaluated by synchrotron radiation angiography. *Stroke*. 2012;43(3):888–891. doi: 10.1161/STROKEAHA.111.636456
9. Liang D, Wiart M, Chauveau F, et al. Pipeline for automatic segmentation of multiparametric MRI data in a rat model of ischemic stroke. *Clin Biomed Imaging*. 2024. P. 26. doi: 10.1117/12.3006149
10. Kuo DP, Kuo PC, Chen YC, et al. Machine learning-based segmentation of ischemic penumbra by using diffusion tensor metrics in a rat model. *J Biomed Sci*. 2020;27(1):80. doi: 10.1186/s12929-020-00672-9 EDN: ENCAEI
11. Fan Y, Song Z, Zhang M. Emerging frontiers of artificial intelligence and machine learning in ischemic stroke: A comprehensive investigation of state-of-the-art methodologies, clinical applications, and unraveling challenges. *EPMA J*. 2023;14(4):645–661. doi: 10.1007/s13167-023-00343-3 EDN: YGLIYW
12. Denic A, Macura SI, Mishra P, et al. MRI in rodent models of brain disorders. *Neurotherapeutics*. 2011;8(1):3–18. doi: 10.1007/s13311-010-0002-4 EDN: LEUNDA
13. Gubskiy IL, Namestnikova DD, Cherkashova EA, et al. MRI guiding of the middle cerebral artery occlusion in rats aimed to improve stroke modeling. *Transl Stroke Res*. 2018;9(4):417–425. doi: 10.1007/s12975-017-0590-y EDN: BYVFPP
14. Hatamizadeh A, Nath V, Tang Y, et al. Swin UNETR: Swin transformers for semantic segmentation of brain tumors in

- MRI images*. In: Conference paper, 22 July 2022. P. 272–284. doi: 10.1007/978-3-031-08999-2_22
15. Van Rossum G, Drake FL. *Python 3 reference manual (Python Documentation Manual Part 2)*. CreateSpace Independent Publishing Platform, Brand: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2009. 242 p.
 16. Yaniv Z, Lowekamp BC, Johnson HJ, Beare R. SimpleITK image-analysis notebooks: A collaborative environment for education and reproducible research. *J Digit Imaging*. 2018;31(3):290–303. doi: 10.1007/s10278-017-0037-8 EDN: YBZILM
 17. Kapur T, Pieper S, Fedorov A, et al. Increasing the impact of medical image computing using community-based open-access hackathons: The NA-MIC and 3D Slicer experience. *Med Image Anal*. 2016;33:176–180. doi: 10.1016/j.media.2016.06.035
 18. Li F, Omae T, Fisher M, et al. Spontaneous hyperthermia and its mechanism in the intraluminal suture middle cerebral artery occlusion model of rats editorial comment. *Stroke*. 1999;30(11):2464–2471. doi: 10.1161/01.STR.30.11.2464
 19. Dorr A, Sled JG, Kabani N. Three-dimensional cerebral vasculature of the CBA mouse brain: A magnetic resonance imaging and micro computed tomography study. *NeuroImage*. 2007;35(4):1409–1423. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.12.040
 20. El Amki M, Clavier T, Perzo N, et al. Hypothalamic, thalamic and hippocampal lesions in the mouse MCAO model: Potential involvement of deep cerebral arteries? *J Neurosci Methods*. 2015;254:80–85. doi: 10.1016/j.jneumeth.2015.07.008
 21. Sokolowski JD, Soldozy S, Sharifi KA, et al. Preclinical models of middle cerebral artery occlusion: New imaging approaches to a classic technique. *Front Neurol*. 2023;14:1170675. doi: 10.3389/fneur.2023.1170675 EDN: MNAKLW
 22. Sutherland BA, Neuhaus AA, Couch Y, et al. The transient intraluminal filament middle cerebral artery occlusion model as a model of endovascular thrombectomy in stroke. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2016;36(2):363–369. doi: 10.1177/0271678X15606722
 23. Themistoklis KM, Papasilekas TI, Melanis KS, et al. transient intraluminal filament middle cerebral artery occlusion stroke model in rats: A step-by-step guide and technical considerations. *World Neurosurg*. 2022;168:43–50. doi: 10.1016/j.wneu.2022.09.043

ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:

Губский Илья Леонидович, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 117513, Москва,
ул. Островитянова, д. 1, стр. 10;
ORCID: 0000-0003-1726-6801;
eLibrary SPIN: 9181-3091;
e-mail: gubskiy.ilya@gmail.com

Соавторы:

Наместникова Дарья Дмитриевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-6635-511X;
eLibrary SPIN: 1576-1860;
e-mail: dadnam89@gmail.com

Черкашова Эльвира Андреевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-9549-9104;
eLibrary SPIN: 3735-3277;
e-mail: tchere@yandex.ru

Гумин Иван Сергеевич;
ORCID: 0000-0003-2360-3261;
eLibrary SPIN: 3454-2665;
e-mail: ivangumin@mail.ru

Губский Леонид Васильевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-7423-1229;
e-mail: gubskii@mail.ru

Баклаусhev Владимир Павлович, д-р мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0003-1039-4245;
eLibrary SPIN: 3968-2971;
e-mail: baklaushev.vp@fnkc-fmba.ru

Чехонин Владимир Павлович, д-р мед. наук,
профессор, академик РАН;
ORCID: 0000-0003-4386-7897;
eLibrary SPIN: 8292-2807;
e-mail: chekhoninnew@yandex.ru

Ярыгин Константин Никитич, д-р биол. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-2261-851X;
eLibrary SPIN: 7567-1230;
e-mail: kyarygin@yandex.ru

AUTHORS' INFO

The author responsible for the correspondence:

Ilya L. Gubskiy, MD, PhD;
address: 1 Ostrovityanova st, build 10, Moscow,
Russia, 117513;
ORCID: 0000-0003-1726-6801;
eLibrary SPIN: 9181-3091;
e-mail: gubskiy.ilya@gmail.com

Co-authors:

Daria D. Namestnikova, MD, PhD;
ORCID: 0000-0001-6635-511X;
eLibrary SPIN: 1576-1860;
e-mail: dadnam89@gmail.com

Elvira A. Cherkashova, MD, PhD;
ORCID: 0000-0001-9549-9104;
eLibrary SPIN: 3735-3277;
e-mail: tchere@yandex.ru

Ivan S. Gumin, MD;
ORCID: 0000-0003-2360-3261;
eLibrary SPIN: 3454-2665;
e-mail: ivangumin@mail.ru

Leonid V. Gubsky, MD, PhD, Professor;
ORCID: 0000-0002-7423-1229;
e-mail: gubskii@mail.ru

Vladimir P. Baklaushev, MD, PhD, Assistant Professor;
ORCID: 0000-0003-1039-4245;
eLibrary SPIN: 3968-2971;
e-mail: baklaushev.vp@fnkc-fmba.ru

Vladimir P. Chekhonin, MD, PhD, Professor,
member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0003-4386-7897;
eLibrary SPIN: 8292-2807;
e-mail: chekhoninnew@yandex.ru

Konstantin N. Yarygin, PhD, Professor;
ORCID: 0000-0002-2261-851X;
eLibrary SPIN: 7567-1230;
e-mail: kyarygin@yandex.ru