



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья

УДК 616-001.31

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-51-65>

Диагностика диффузного аксонального повреждения с помощью диффузионно-куртозисной МРТ и методов радиомики

Р. М. Афандиев¹, Н. Е. Захарова², Г. В. Данилов³, Э. Л. Погосбекян⁴,
С. А. Горяйнов⁵, Я. А. Латышев⁶, А. В. Косырькова⁷, А. Д. Кравчук⁸,
Д. Ю. Усачев⁹, И. Н. Пронин¹⁰

^{1–10} ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

¹ rafandiev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6384-7960>

² nzakharova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

³ gdanilov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1442-5993>

⁴ epogosbekyan@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁵ sgoraynov@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁶ ylatyshev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7125-5962>

⁷ akosyrkova@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3019-5203>

⁸ kravtchouk@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3112-8256>

⁹ dousachev@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

¹⁰ pronin@nsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Автор, ответственный за переписку: Рамин Малик оглы Афандиев, rafandiev@nsi.ru

Резюме

Цель исследования — оценить информативность параметров радиомики по данным диффузионно-куртозисной МРТ (ДК МРТ) для выявления микроструктурных повреждений головного мозга при диффузном аксональном повреждении (ДАП) и прогнозирования его исходов. Предполагалось, что характеристики радиомики, рассчитанные по параметрическим картам ДК МРТ, могут различаться у здоровых людей и при травме, а также быть связанными с исходом ДАП. Обследован 31 пациент с ДАП и 12 здоровых добровольцев. Всего было рассчитано 342 300 параметров радиомики (по 2282 признака на каждую комбинацию 10 параметрических карт ДК МРТ с 15 областями интереса). Результаты показали, что совокупность параметров радиомики является информативной

© Афандиев Р. М., Захарова Н. Е., Данилов Г. В., Погосбекян Э. Л., Горяйнов С. А., Латышев Я. А., Косырькова А. В., Кравчук А. Д., Усачев Д. Ю., Пронин И. Н., 2024

для дифференцирования здоровых и поврежденных тканей головного мозга, а также прогнозирования исхода при ДАП. Расширенный спектр параметров радиомики по данным ДК МРТ демонстрирует высокий диагностический и прогностический потенциал при ДАП, а также преимущества перед традиционно используемыми средними значениями по областям интереса на параметрических картах ДК МРТ.

Ключевые слова: диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография, диффузное аксональное повреждение, радиомика, машинное обучение

Для цитирования: Афандиев Р. М., Захарова Н. Е., Данилов Г. В., Погосбемян Э. Л., Горайнов С. А., Латышев Я. А., Косырькова А. В., Кравчук А. Д., Усачев Д. Ю., Пронин И. Н. Диагностика диффузного аксонального повреждения с помощью диффузионно-куртозисной МРТ и методов радиомики // Радиология — практика. 2024;1:51-65. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-51-65>

ORIGINAL RESEARCH

Original research

Diffusion Kurtosis Imaging and Radiomics in Diffuse Axonal Injury

R. M. Afandiev¹, N. E. Zakharova², G. V. Danilov³, E. L. Pogosbekyan⁴, S. A. Goryaynov⁵, Ya. A. Latyshev⁶, A. V. Kosyr'kova⁷, A. D. Kravchuk⁸, D. Yu. Usachev⁹, I. N. Pronin¹⁰

¹⁻¹⁰ N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

¹ rafandiev@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6384-7960>

² nzakharova@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>

³ gdanilov@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1442-5993>

⁴ epogosbekyan@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4803-6948>

⁵ sgoraynov@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6480-3270>

⁶ ylatyshev@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7125-5962>

⁷ akosyrkova@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3019-5203>

⁸ kravtchouk@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3112-8256>

⁹ dousachev@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9811-9442>

¹⁰ pronin@qnsi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>

Corresponding author: Ramin M. Afandiev, rafandiev@qnsi.ru

Abstract

This study aimed to assess the feasibility of radiomic features derived from diffusion kurtosis imaging (DK MRI) in identifying microstructural brain damage in diffuse axonal injury (DAI) and predicting its outcome. We hypothesized that radiomic features, computed from parametric DK MRI maps, may differ between healthy individuals and those with trauma, and may be related to DAI outcomes. The study included 31 DAI patients and 12 healthy volunteers. A total of 342,300

radiomic features were calculated (2282 features for each combination of 10 parametric DK maps with 15 regions of interest). Our findings suggest that the set of radiomic features effectively distinguishes between healthy and damaged brain tissues, and can predict DAI outcome. A broad spectrum of radiomic parameters based on DK MRI data showed high diagnostic and prognostic potential in DAI, presenting advantages beyond the traditionally used average values for the regions of interest on parametric DK MRI maps.

Keywords: Diffusion-Kurtosis Magnetic Resonance Imaging; Diffuse Axonal Injury; Radiomics; Machine Learning

For citation: Afandiev R. M., Zakharova N. E., Danilov G. V., Pogosebkyan E. L., Goryaynov S. A., Latyshev Ya. A., Kosyr'kova A. V., Kravchuk A. D., Usachev D. Y., Pronin I. N. Diffusion Kurtosis Imaging and Radiomics in diffuse axonal injury. *Radiology – Practice*. 2024;1:51-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2024-1-51-65>

Актуальность

Диффузное аксональное повреждение (ДАП) — один из наиболее тяжелых видов черепно-мозговой травмы (ЧМТ). В условиях выраженного угнетения сознания, в том числе медикаментозной седации, тяжелого состояния пациента, затрудненной неврологической оценки в остром периоде ДАП крайне сложно спрогнозировать дальнейшее клиническое течение заболевания и перспективы восстановления функций нервной ткани. В работах отечественных исследователей была продемонстрирована высокая прогностическая значимость уровня и локализации макро- и микроструктурных повреждений вещества головного мозга, которые можно объективно определить только с помощью современных режимов магнитно-резонансной томографии (МРТ) [1, 3]. Таким образом, поиск МР-биомаркеров, наилучшим образом отражающих детали микроструктурных изменений как в сером, так и в белом веществе, а также тяжесть травмы, является крайне важной задачей для повышения диагностической и прогностической информативности диагностики ДАП.

Диффузионно-куртозисная магнитно-резонансная томография (ДК МРТ) — это усовершенствованный метод диффузионно-взвешенной МРТ,

способный отражать повреждения нейронов и их аксонов в сером и белом веществе головного мозга, которые не визуализируются при помощи стандартных последовательностей МРТ [5]. Однако ввиду трудоемкости постобработки данных ДК МРТ применяют при ДАП крайне редко, и на сегодняшний день количественная оценка повреждений мозга по ДК МРТ чаще ограничивается расчетом только средних значений на параметрических картах в пределах областей интереса (англ. Regions of interest, ROI) [2].

Радиомика — это быстро развивающаяся область исследований, связанная с извлечением количественных показателей из медицинских изображений. Радиомика может использоваться для регистрации свойств тканей и поражений, таких как форма и неоднородность, а также их изменений в динамике, например, во время лечения или наблюдения. Данные радиомики можно комбинировать с клиническими, лабораторными, гистологическими, геномными, клиническими исходами или другими данными с использованием машинного обучения [11]. Поэтому исследование таких характеристик в различных ROI на разных параметрических картах ДК МРТ может повысить информативность ДК МРТ при ЧМТ.

Цель: оценить информативность параметров радиомикки по данным диффузионно-куртозисной магнитно-резонансной томографии для выявления микроструктурных повреждений головного мозга у пациентов при диффузном аксональном повреждении и прогнозирования его исходов.

Материалы и методы

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России. В исследование был включен 31 пациент с ДАП (средний возраст $31,48 \pm 11,10$ года, 8 (25,8 %) женщин) и 12 здоровых добровольцев (средний возраст $33,67 \pm 11,06$ года, 4 (33,3 %) женщины).

Для пациентов с ДАП и контрольной группы были определены критерии включения и исключения.

Критерии включения:

- 1) мужчины и женщины в возрасте от 13 до 68 лет, направленные на лечение, и контрольная группа без патологии головного мозга, подписавшие информированное добровольное согласие на обследование. При отсутствии возможности пациента

подписать информированное добровольное согласие в связи с тяжестью состояния это делали родственники;

- 2) наличие острой черепно-мозговой травмы для пациентов из основной группы (до 1 месяца после ЧМТ);
- 3) подтверждение наличия ДАП по данным МРТ.

Критерии исключения:

- 1) отказ от подписания информированного согласия;
- 2) наличие магнитных имплантов, датчика внутричерепного давления брекетов, клипс и т. д.;
- 3) тяжесть состояния: неустойчивая гемодинамика, повышение АД, декомпенсированная сердечная недостаточность и т. д.

В ходе исследования и обработки полученных данных ни один из пациентов не был исключен из исследования. Основную группу пациентов с ДАП составили тяжелые больные по шкале комы Глазго (ШКГ) (табл. 1).

ДК МРТ выполняли в течение первых 28 дней после травмы головного мозга с использованием эхопланарной импульсной последовательности спиновое эхо — SE EPI: TR = 10 000 мс, минимальное время эхо (TE) = 103,4 мс, поле

Таблица 1

Распределение пациентов с ДАП по ШКГ

Тяжесть травмы по шкале комы Глазго	Количество пациентов	Распределение по полу	
		м	ж
15 баллов (ясное сознание)	0	0	0
13–14 баллов (умеренное оглушение)	3	3	0
11–12 баллов (глубокое оглушение)	2	2	0
8–10 (сопор)	9	8	1
6–7 баллов (умеренная кома)	8	4	4
4–5 баллов (глубокая кома)	9	6	3
3 балла (терминальная кома)	0	0	0
Всего	31	23	8

зрения (FOV) = 240 × 240 мм, размер изотропного вокселя 3 × 3 × 3 мм³, толщина среза 3 мм, нулевой зазор, NEX = 1, набор диффузионных градиентов по 60 направлениям для каждого ненулевого значения b-фактора. Измерения проводились для трех значений диффузионного взвешивания (b-факторов): 0, 1000 и 2500 с/мм². Время получения ДК МРТ составило 22 мин. Общая продолжительность исследования — 40 мин.

Перед оценкой параметрических карт ДК МРТ необработанные данные диффузии были скорректированы с учетом искажений изображения (шум и артефакты Гиббса) с использованием утилит *dwidenoise* и *mrdegibbs* из программного пакета *MRtrix3*. Затем были скорректированы артефакты движения головы и вихретоковые искажения с помощью утилиты *eddy* из библиотеки программного обеспечения *FMRIB Software Library (FSL)*. Дополнительно были исключены немозговые структуры с помощью утилиты *dwi2mask* из пакета *MRtrix3* (<https://www.mrtrix.org>). Далее были рассчитаны 10 параметрических карт ДК МРТ с помощью библиотеки *DIPY* на языке программирования *python 3*:

АК — аксиальный куртозис;
AWF — фракция аксональной воды;
AxEAD — аксиальная экстрааксональная диффузия воды;
FA — фракционная анизотропия;
MD — средняя диффузия;
КА — куртозисная анизотропия;

МК — средний куртозис;
RadEAD — радиальная экстрааксональная диффузия воды;
RK — радиальный куртозис;
TORT — извитость экстрааксонального пространства.

Приложение *ITKSnap* было применено для выделения 15 стандартизированных 2D-областей интереса (ROI) в белом веществе головного мозга (билатерально: семиовальный центр, ножка мозга, переднее и заднее бедра внутренней капсулы; непарные зоны: мост, колено и валик мозолистого тела) и сером веществе головного мозга (таламус и чечевицеобразное ядро) на каждой параметрической карте ДК МРТ. Размеры ROI определяли на основе анатомических областей. Таким образом, каждая область интереса была установлена только на одном аксиальном срезе для каждой карты ДК МРТ (рис. 1). В результате суммарно на 10 параметрических картах ДК МРТ каждого исследования мы выделили 150 уникальных зон интереса.

Извлечение параметров радиомики и их анализ выполняли с использованием языка программирования *R* (версия 4.2.2) в среде *RStudio Server IDE* (версия 2022.07.0+548) на суперкомпьютере *NVIDIA DGX A100*. Параметры радиомики рассчитывали внутри каждой ROI с использованием библиотеки *RIA* [12]. Значения ROI были равномерно дискретизированы на 2, 4 и 8 уровней. Производился расчет статистики пер-

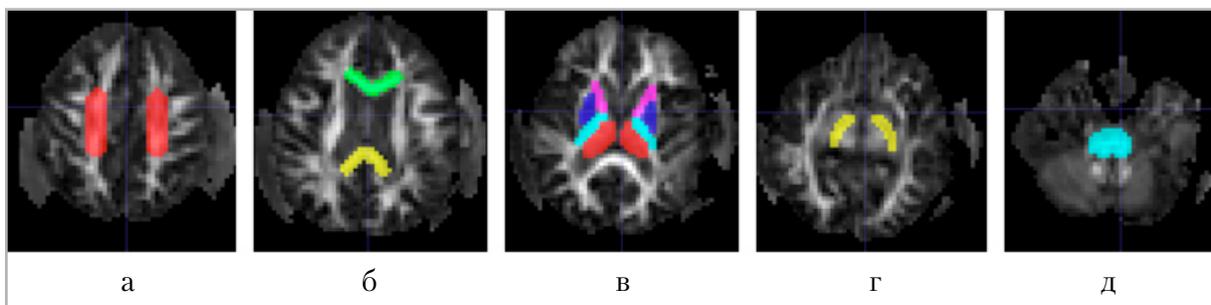


Рис. 1. ДК МРТ пациента с ДАП. На карте FA билатерально выделены области интереса: а — семиовальный центр, б — колено и валик мозолистого тела, в — переднее и заднее бедро внутренней капсулы, чечевицеобразное ядро, таламус, г — ножка мозга, д — ствол мозга

вого порядка, характеристики матрицы совместной встречаемости уровней серого (англ. — gray level co-occurrence matrix, GLCM), матрицу длин пробегов уровней серого (англ. — gray level run-length matrix, GLRLM) и статистики на основе геометрических свойств изображений (фрактальные размерности и др.; полный список функций представлен в работе [7]).

На первом этапе анализа отбирали параметры радиомики, распределение которых наиболее статистически значимо различалось либо в группах здоровых добровольцев и пациентов с ДАП, либо в подгруппах пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом ЧМТ. Клинический исход оценивали по шкале функциональной независимости (англ. — Functional Independence Measure, FIM) через три месяца после травмы и позже, поскольку состояние пациентов в этот период, как правило, стабилизировалось. Исход считали благоприятным при значениях FIM ≥ 100 .

Гипотезу о комплексной взаимосвязи отобранных параметров радиомики и состояния вещества головного мозга, а также прогностическое значение этих параметров проверяли с использованием машинного обучения (МО). Проводили две серии экспериментов:

- 1) определяли различия между изображениями здоровых людей и пациентов с ДАП;
- 2) классифицировали изображения в соответствии с исходом ЧМТ (благоприятным и неблагоприятным).

Были подготовлены четыре набора данных. В первом наборе данных «Норма/ДАП» целевая переменная принимала значения «здоровый доброволец» и «ДАП». В этот набор в качестве предикторов включали параметры радиомики, независимо отличавшие здоровых добровольцев от пациентов на уровне $p < 0,00001$. Второй набор данных «Норма/ДАП (средние)» содержал ту же целевую переменную и топ-10 наиболее

статистически значимых средних значений по всем возможным ROI ($p < 0,05$). Третий набор данных, «ДАП», включал бинарную целевую переменную («благоприятный исход ДАП/неблагоприятный исход ДАП») и топ-10 статистически значимых параметров радиомики ($p < 0,05$), распределения которых независимо различались у пациентов с благоприятными и неблагоприятными исходами. Четвертый набор данных «ДАП (средние)» сохранял ту же целевую переменную и включал топ-10 статистически различающихся средних значений ДК МРТ по ROI ($p < 0,05$).

Для прогнозирования значений целевой переменной в каждом наборе данных использовали модели МО четырех типов: «случайный лес» (англ. — random forest, RF), логистическая регрессия (англ. — logistic regression, LR), метод опорных векторов (англ. — support vector machine, SVM) и базовая модель без предикторов (англ. — featureless model, FM), которая всегда прогнозировала целевую переменную только одним значением преобладающего класса. Эти четыре алгоритма, примененные к четырем наборам данных, позволили провести 16 экспериментов по МО. Каждый эксперимент повторяли 300 раз со случайным разделением исходного набора данных на обучающую (2/3 данных) и тестовую (1/3 данных) выборки в каждой итерации. Метрики качества работы моделей на тестовых выборках были усреднены по всем экспериментам для получения более надежных оценок. Процедуры МО были реализованы с использованием экосистемы пакетов mlr3 на языке программирования R.

Результаты и их обсуждение

Всего было рассчитано 342 300 параметров радиомики (2282 признака на каждую комбинацию из 10 параметрических карт ДК МРТ с 15 ROI). Деять параметров достоверно различа-

лись у пациентов с разными исходами на уровне значимости $p < 0,0001$. На рис. 2 показано распределение основных параметров, которые демонстрируют статистически значимые различия между здоровыми добровольцами и пациентами. На рис. 3 проиллюстрировано распределение основных параметров, которые отражают статистически значимые различия между пациентами,

у которых наблюдались благоприятные и неблагоприятные исходы. Как видно, здоровые добровольцы достоверно отличались от пациентов с ЧМТ по показателям ДК МРТ, поскольку диапазоны параметров на графике в этих группах не пересекались.

В табл. 2 представлены метрики качества МО, косвенно показывающие диагностическую и прогностическую цен-

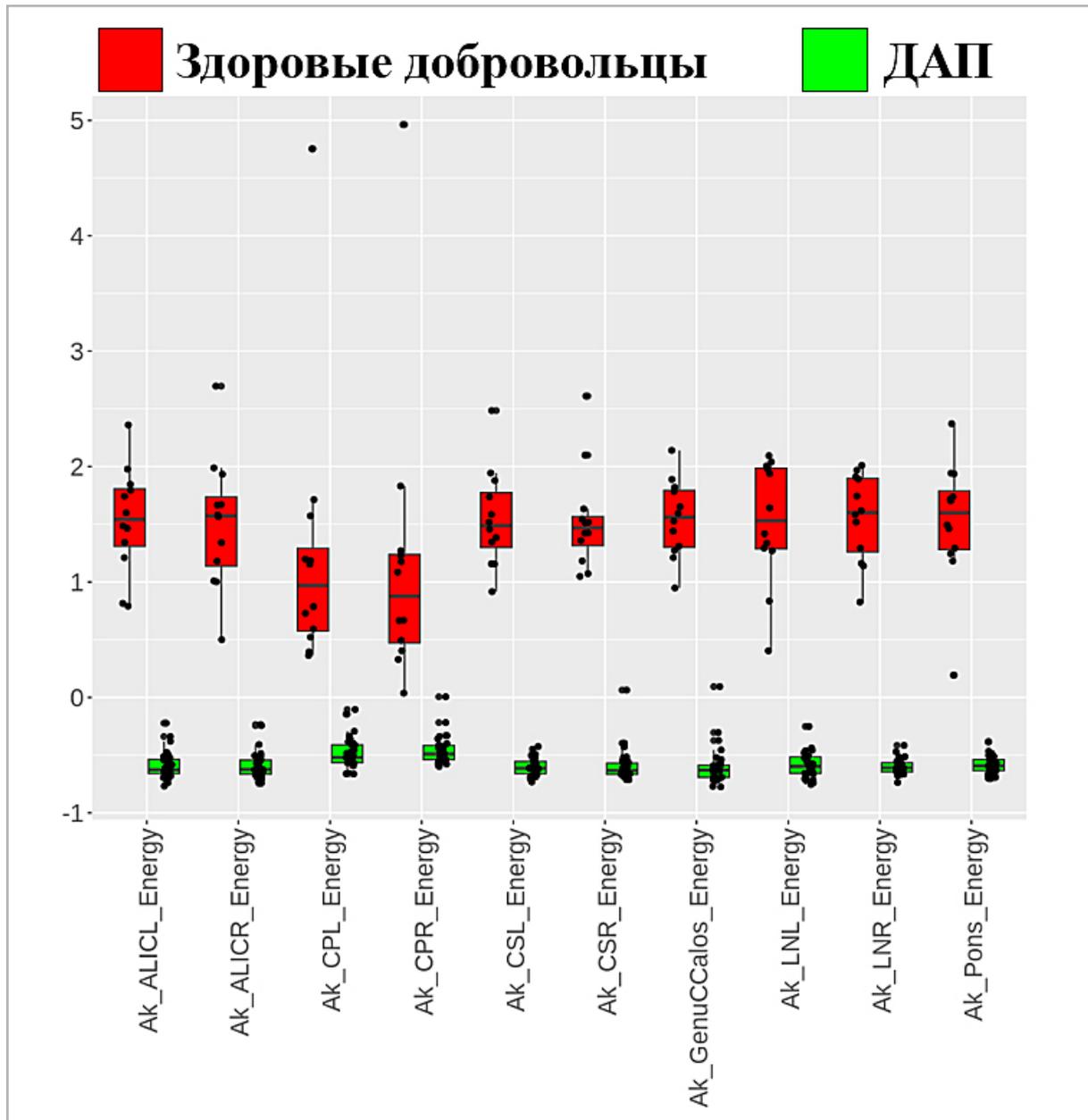


Рис. 2. Распределение наиболее различающихся параметров радиомики у пациентов с ДАП и здоровых добровольцев. Ак – аксиальный куртозис; ALIC L/R – передняя ножка внутренней капсулы, левая/правая; CP L/R – ножка мозга, левая/правая; CS L/R – семиовальный центр, слева/справа; GenuCCalos – колено мозолистого тела; LN L/R – чечевицеобразное ядро, слева/справа; Pons – ствол мозга. Energy – тип характеристики радиомики

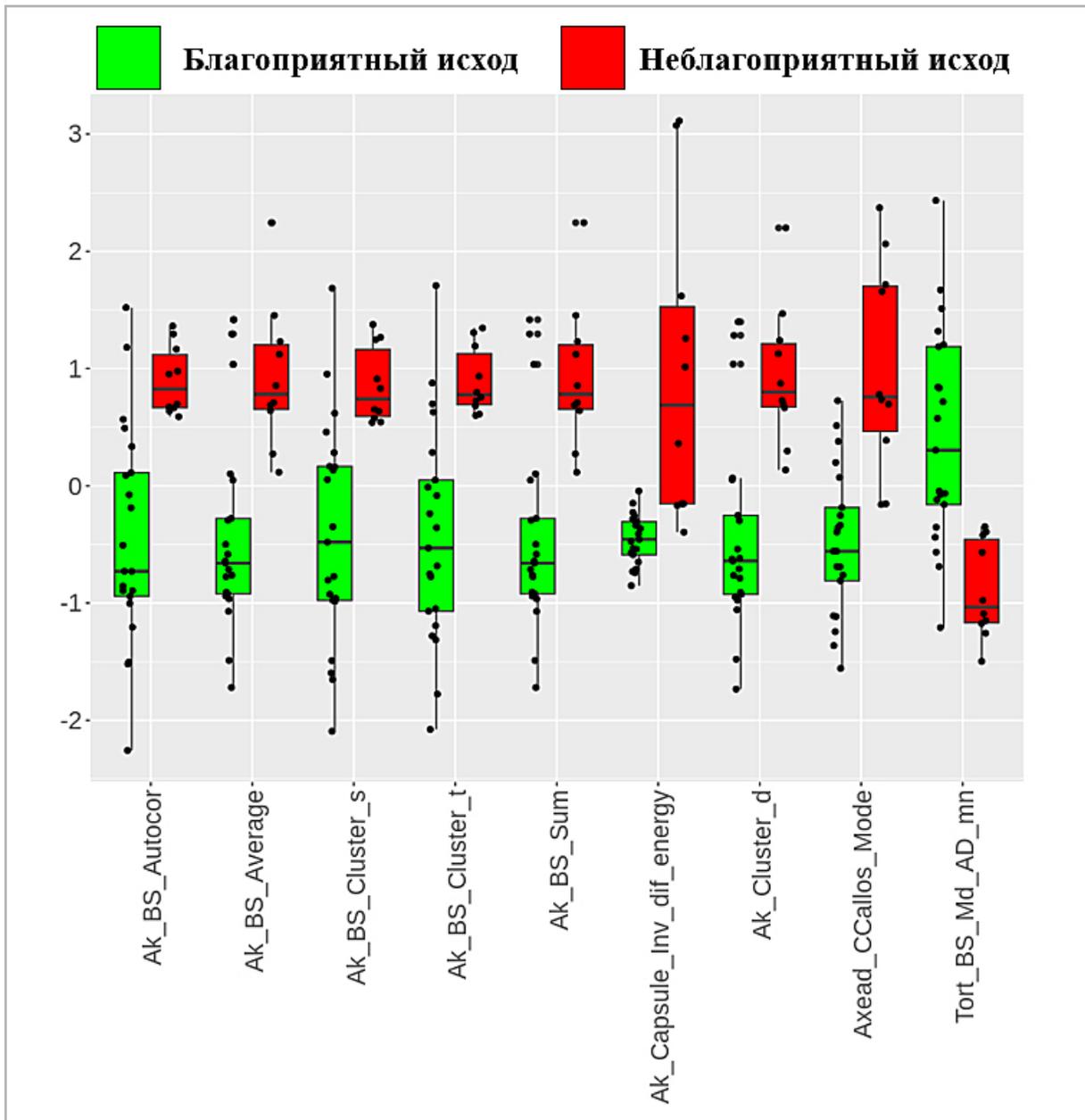


Рис. 3. Распределение наиболее различающихся параметров радиомики у пациентов с благоприятным и неблагоприятным исходом ДАП. Ak – аксиальный куртозис; Ahead – аксиальная экстрааксональная диффузия воды; Tort – извитость экстрааксонального пространства; Pons, BS – ствол мозга; Capsule – заднее бедро внутренней капсулы справа; CCallos – колено мозолистого тела; Autocor, Average, Cluster, Sum, Inv_dif_energy, Mode, Md_AD – различные типы параметров радиомики

Таблица 2

Метрики качества моделей машинного обучения в различных наборах данных

Набор данных	Модель	ACC	SEN	SPE	F1	ROC AUC	PR AUC
N vs. TBI	LR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N vs. TBI	SVM	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

продолжение таблицы 2

Набор данных	Модель	ACC	SEN	SPE	F1	ROC AUC	PR AUC
N vs. TBI	RF	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N vs. TBI	FM	0,692	0	1,000	-	0,500	0,308
N vs. TBI (avg.)	LR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N vs. TBI (avg.)	SVM	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N vs. TBI (avg.)	RF	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N vs. TBI (avg.)	FM	0,692	0	1,000	—	0,500	0,308
F vs. U TBI	SVM	0,935	0,878	0,964	0,890	0,997	0,994
F vs. U TBI	RF	0,918	0,970	0,892	0,896	0,989	0,982
F vs. U TBI	LR	0,906	0,887	0,916	0,858	0,971	0,941
F vs. U TBI	FM	0,667	0	1,000	—	0,500	0,333
F vs. U TBI (avg.)	RF	0,770	0,737	0,786	—	0,872	0,824
F vs. U TBI (avg.)	SVM	0,763	0,428	0,931	—	0,775	0,778
F vs. U TBI (avg.)	LR	0,685	0,337	0,859	—	0,637	0,522
F vs. U TBI (avg.)	FM	0,667	0	1,000	—	0,500	0,333

Примечания: LR — логистическая регрессия; SVM — метод опорных векторов; RF — случайный лес; FM — базовая модель без предиктора; N — здоровые добровольцы; F — благоприятный исход; U — неблагоприятный исход; ACC — точность; SEN — чувствительность; SPE — специфичность; F1 — F-мера; ROC AUC — площадь под ROC-кривой; PR AUC — площадь под кривой precision-recall

ность различных наборов параметров радиомики в разных задачах.

Как видно из таблицы, базовые модели без признаков во всех случаях продемонстрировали низкое качество МО.

Изображения здорового вещества мозга и пострадавшего от ДАП удалось различить с абсолютной точностью с помощью моделей машинного обучения LR, SVM и RF.

Работ с использованием радиомики при черепно-мозговой травме крайне мало [8–10, 13–16], и в основном они

направлены на изучение травмы легкой степени тяжести. В доступной литературе не обнаружено ни одной работы, связанной с использованием радиомики при ДАП.

Luo X. et al. (2021) [10] изучали эффективность машинного обучения в дифференциальной диагностике поврежденного вещества головного мозга при легкой ЧМТ и нормального мозга у контрольной группы. Для этого они провели функциональное МРТ в состоянии покоя 24 пациентам с легкой ЧМТ (15

мужчин и 9 женщин; средний возраст $38,88 \pm 13,33$ года) и 24 здоровым добровольцам того же возраста (13 мужчин и 11 женщин; средний возраст $40,46 \pm 11,4$ года). В своей работе авторы изучили семь параметров визуализации, полученные при обработке функциональной МРТ, в различных локализациях [ALFF (англ. — amplitude of low-frequency fluctuation), fALFF (англ. — fractional amplitude of low-frequency fluctuation), ReHo (англ. — regional homogeneity), DC (англ. — degree centrality), VMHC (англ. — voxel-mirrored homotopic connectivity), FCD (англ. — long-range functional connectivity density) и short-range FCD (англ. — short-range functional connectivity density)], карты которых использовались для ROI и извлечения параметров радиомики.

Комбинация параметров визуализации ALFF, fALFF, DC, VMHC и short-range FCD показала неплохие результаты в дифференциации двух групп с оптимальным значением AUC 0,778, уровнем точности 81,11 %, чувствительностью 88 % и специфичностью 75 %. На основе полученных результатов авторы сделали вывод, что комбинация нескольких параметров визуализации может улучшить эффективность дифференциальной диагностики нормального и поврежденного вещества мозга при легкой ЧМТ.

Zhang L. et al. (2022) [15] попытались с помощью радиомики и статистического анализа прогнозировать рецидив гематомы и исходы по шкале исходов Глазго (ШИГ) у пациентов с ушибами головного мозга. Для этого ретроспективно были изучены 88 пациентов с внутричерепным кровоизлиянием, диагностированным при помощи КТ. Авторы работы провели сравнительное исследование между клиническими факторами и рентгенологическими признаками. Были учтены девятнадцать клинических факторов, 513 признаков радиомики и 116 локаль-

ных особенностей. Среди клинических факторов, способствующих рецидиву гематомы, учитывались международное нормализованное отношение, протромбиновое время и фибриноген. Что касается исходов, то ассоциированными факторами были: тактика лечения, возраст пациента, оценка по шкале комы Глазго и уровень тромбоцитов. Восемь количественных признаков исходов и пять признаков рецидива гематомы были отфильтрованы с использованием комбинированного проекционного метода с разреженным представлением и сохранением локальности. После совмещения показателей радиомики площадь под кривой прогноза рецидива гематомы увеличилась с 0,832 до 0,899, тогда как прогноз по ШИГ увеличился с 0,794 до 0,844. В результате исследования авторы пришли к выводу, что модель, основанная на радиомике, а также комбинация радиомики и клинических особенностей представляют собой неинвазивный подход к прогнозированию рецидива гематомы, а также клинических исходов ушибов головного мозга при ЧМТ.

Учитывая данные литературы, настоящее исследование впервые оценивает многочисленные параметры радиомики по картам ДК МРТ при ДАП. Мы увидели, что большинство признаков значимо различаются ($p < 0,001$) у пациентов и здоровых добровольцев, что может служить для объективной диагностики ДАП. Более того, средние значения ROI так же информативны для дифференцирования здорового и поврежденного мозга, как другие параметры радиомики (табл. 2). Однако в задаче прогноза исходов ДАП была продемонстрирована более высокая прогностическая ценность спектра параметров радиомики по сравнению с использованием только средних значений. Это подтверждает значимость использованного метода для выявления особенностей микроструктурных изменений белого

и серого вещества головного мозга при прогнозировании исходов ЧМТ [4, 6].

Очевидным ограничением нашего исследования является небольшой размер выборки, который не адекватен для создания надежных моделей МО. Тем не менее использовалась методология МО в первую очередь для того, чтобы продемонстрировать потенциал расширенного спектра параметров радиомики по сравнению с традиционными усредненными показателями ДК МРТ в диагностике и определении тяжести ДАП. Тем не менее наблюдаемые различия количественных характеристик были достаточно выраженными и явно определяемыми даже на небольшой выборке.

Выводы

Расширенный спектр параметров радиомики по данным ДК МРТ при ДАП демонстрирует существенный диагностический и прогностический потенциал и преимущества перед традиционно используемыми средними значениями ROI на параметрических картах ДК МРТ.

Список источников

- Захарова Н. Е., Данилов Г. В., Потапов А. А., Пронин И. Н., Александрова Е. В., Кравчук А. Д., Ошоров А. В., Сычев А. А., Полупан А. А., Савин И. А. Прогностическое значение МРТ-классификации уровней и локализации травматического повреждения мозга в зависимости от сроков обследования пациентов // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2019. Т. 83, № 4. С. 45–55.
- Захарова Н. Е., Потапов А. А., Пронин И. Н., Данилов Г. В., Александрова Е. В., Фадеева Л. М., Погосбемян Э. Л., Баталов А. И., Горяйнов С. А. Изменение параметров диффузионно-куртосисной МРТ у пациентов с диффузным аксональным повреждением // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2019. Т. 83, № 3. С. 5–16.
- Потапов А. А., Данилов Г. В., Сычев А. А., Захарова Н. Е., Пронин И. Н., Савин И. А., Ошоров А. В., Полупан А. А., Александрова Е. В., Струнина Ю. В., Лихтерман Л. Б., Охлопков В. А., Латышев Я. А., Чёлушкин Д. М., Баранич А. И., Кравчук А. Д. Клинические и магнитно-резонансные томографические предикторы длительности комы, объема интенсивной терапии и исходов при черепно-мозговой травме // «Вопросы нейрохирургии» имени Н. Н. Бурденко. 2020. Т. 84, № 4. С. 5–16.
- Benson R. R., Meda S. A., Vasudevan S. et al. Global white matter analysis of diffusion tensor images is predictive of injury severity in traumatic brain injury. *J. Neurotrauma*. 2007. V. 24, no. 3. P. 446–459.
- Grossman E. J., Ge Y., Jensen J. H. et al. Thalamus and Cognitive Impairment in Mild Traumatic Brain Injury: A Diffusional Kurtosis Imaging Study. *J. Neurotrauma*. 2012. V. 29, no. 13. P. 2318.
- Henriques R. N., Correia M. M., Marrale M. et al. Diffusional Kurtosis Imaging in the Diffusion Imaging in Python Project. *Front Hum Neurosci*. 2021. V. 15.
- Kolossváry M., Karády J., Szilveszter B. et al. Radiomic Features Are Superior to Conventional Quantitative Computed Tomographic Metrics to Identify Coronary Plaques With Napkin-Ring Sign – SUPPLEMENTAL MATERIAL. *Circ. Cardiovasc. Imaging*. 2017. V. 10, no. 12.
- Li Y., Zhang G., Shan Y. et al. Non-Invasive Assessment of Intracranial Hypertension in Patients with Traumatic Brain Injury Using Computed Tomography Radiomic Features: A Pilot Study. *J. Neurotrauma*. 2023. V. 40, no. 3–4. P. 250–259.
- Liu J., Shan Y., Gao G. The application value of CT radiomics features in predicting pressure amplitude correlation index in patients with severe traumatic brain injury. *Front. Neurol*. 2022. V. 13.
- Luo X., Lin D., Xia S. et al. Machine Learning Classification of Mild Traumatic Brain Injury Using Whole-Brain

- Functional Activity: A Radiomics Analysis. *Dis Markers*. 2021.
11. Mayerhoefer M. E., Materka A., Langs G. et al. Introduction to Radiomics. *J. Nucl. Med.* 2020. V. 61, no. 4. P. 488–495.
 12. RIA package manual [Internet]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/RIA/vignettes/RIA.html>.
 13. Shih Y. J., Liu Y. L., Chen J. H. et al. Prediction of Intraparenchymal Hemorrhage Progression and Neurologic Outcome in Traumatic Brain Injury Patients Using Radiomics Score and Clinical Parameters. *Diagnostics (Basel)*. 2022. V. 12, no. 7. P. 1677.
 14. Tamez-Peña J., Rosella P., Totterman S. et al. Post-concussive mTBI in Student Athletes: MRI Features and Machine Learning. *Front Neurol*. 2022. V. 12.
 15. Zhang L., Zhuang Q., Wu G. et al. Combined Radiomics Model for Prediction of Hematoma Progression and Clinical Outcome of Cerebral Contusions in Traumatic Brain Injury. *Neurocrit. Care*. 2022. V. 36, no. 2. P. 441–451.
 16. Zheng R. Z., Zhao Z. J., Yang X. T. et al. Initial CT-based radiomics nomogram for predicting in-hospital mortality in patients with traumatic brain injury: a multicenter development and validation study. *Neurol. Sci.* 2022. V. 43, no. 7. P. 4363–4372.
- ## References
1. Zakharova N. E., Danilov G. V., Potapov A. A. et al. The prognostic value of mri-classification of traumatic brain lesions level and localization depending on neuroimaging timing. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2019;83(4):46-55. (In Russ.).
 2. Zakharova N. E., Potapov A. A., Pronin I. N. et al. Diffusion kurtosis imaging in diffuse axonal injury. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2019;83(3):5-16 (In Russ.).
 3. Potapov A. A., Danilov G. V., Sychev A. A. et al. Clinical and MRI predictors of coma duration, critical care intensity and outcomes in traumatic brain injury. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N. N. Burdenko*. 2020;84(4):5-16 (In Russ.).
 4. Benson R. R., Meda S. A., Vasudevan S. et al. Global white matter analysis of diffusion tensor images is predictive of injury severity in traumatic brain injury. *J. Neurotrauma*. 2007;24(3):446-459.
 5. Grossman E. J., Ge Y., Jensen J. H. et al. Thalamus and Cognitive Impairment in Mild Traumatic Brain Injury: A Diffusional Kurtosis Imaging Study. *J. Neurotrauma*. 2012;29(13):2318.
 6. Henriques R. N., Correia M. M., Marrale M. et al. Diffusional Kurtosis Imaging in the Diffusion Imaging in Python Project. *Front. Hum. Neurosci.* 2021;15.
 7. Kolossváry M., Karády J., Szilveszter B. et al. Radiomic Features Are Superior to Conventional Quantitative Computed Tomographic Metrics to Identify Coronary Plaques With Napkin-Ring Sign - SUPPLEMENTAL MATERIAL. *Circ. Cardiovasc. Imaging*. 2017;10(12).
 8. Li Y., Zhang G., Shan Y. et al. Non-Invasive Assessment of Intracranial Hypertension in Patients with Traumatic Brain Injury Using Computed Tomography Radiomic Features: A Pilot Study. *J. Neurotrauma*. 2023;40(3–4):250-259.
 9. Liu J., Shan Y., Gao G. The application value of CT radiomics features in predicting pressure amplitude correlation index in patients with severe traumatic brain injury. *Front. Neurol.* 2022;13.
 10. Luo X., Lin D., Xia S. et al. Machine Learning Classification of Mild Traumatic Brain Injury Using Whole-Brain Functional Activity: A Radiomics Analysis. *Dis Markers*. 2021.
 11. Mayerhoefer M. E., Materka A., Langs G. et al. Introduction to Radiomics. *J. Nucl. Med.* 2020;61(4):488-495.
 12. RIA package manual [Internet]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/RIA/vignettes/RIA.html>.
 13. Shih Y. J., Liu Y. L., Chen J. H. et al. Prediction of Intraparenchymal He-

- morrhage Progression and Neurologic Outcome in Traumatic Brain Injury Patients Using Radiomics Score and Clinical Parameters. *Diagnostics (Basel)*. 2022;12(7):1677.
14. Tamez-Peña J., Rosella P., Totterman S. et al. Post-concussive mTBI in Student Athletes: MRI Features and Machine Learning. *Front. Neurol.* 2022;12.
 15. Zhang L., Zhuang Q., Wu G. et al. Combined Radiomics Model for Prediction of Hematoma Progression and Clinical Outcome of Cerebral Contusions in Traumatic Brain Injury. *Neurocrit. Care.* 2022;36(2):441-451.
 16. Zheng R. Z., Zhao Z. J., Yang X. T. et al. Initial CT-based radiomics nomogram for predicting in-hospital mortality in patients with traumatic brain injury: a multicenter development and validation study. *Neurol. Sci.* 2022;43(7):4363–4372

Сведения об авторах / Information about the authors

Афандиев Рамин Малик оглы, врач отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (919) 999-88-21

Вклад автора: разработка концепции – формирование идеи, цели и написание текста.

Afandiev Ramin Malik ogly, Doctor of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (919) 999-88-21

Author's contribution: concept development – formation of an idea, goals and writing a text.

Захарова Наталья Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник, отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Zakharova Natal'ya Evgen'evna, M. D. Med., Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Research Fellow, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Данилов Глеб Валерьевич, кандидат медицинских наук, ученый секретарь ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: расчет параметров радиомики, статистический анализ данных.

Danilov Gleb Valer'evich, Ph. D. Med., Scientific Secretary N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: calculation of radiomics parameters, statistical data analysis.

Погосбемян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (985) 246-43-68
Вклад автора: статистический анализ данных.

Pogosbekyan Eduard Leonidovich, Medical Physicist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (985) 246-43-68
Author's contribution: statistical data analysis.

Горяйнов Сергей Алексеевич, доктор медицинских наук, нейрохирург, заведующий лабораторией нейрохирургической анатомии и криоконсервации биологических материалов ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (499) 972-85-55
Вклад автора: определение концепции и дизайн работы.

Goryaynov Sergey Alekseevich, M. D. Med., Neurosurgeon, Head of the Laboratory of Neurosurgical Anatomy and Cryopreservation of Biological Materials N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55
Author's contribution: conception and design of the work.

Латышев Ярослав Александрович, кандидат медицинских наук, нейрохирург ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (499) 972-85-55
Вклад автора: сбор полученных данных и разработка дизайна исследования.

Latyshev Yaroslav Aleksandrovich, Ph. D. Med., Neurosurgeon N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55
Author's contribution: performing data collection and developing the study design.

Косырькова Александра Вячеславовна, кандидат медицинских наук, нейрохирург ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (499) 972-85-55
Вклад автора: сбор полученных данных и разработка дизайна исследования.

Kosyrkova Aleksandra Vyacheslavovna, Ph. D. Med., Neurosurgery N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.
+7 (499) 972-85-55
Author's contribution: performing data collection and developing the study design.

Кравчук Александр Дмитриевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий 9-м нейрохирургическим отделением (черепно-мозговая травма) ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия. 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.
+7 (499) 972-85-55
Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Kravchuk Aleksandr Dmitrievich, M. D. Med., Professor, Head of the 9th neurosurgical department (traumatic brain injury), N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Усачев Дмитрий Юрьевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Usachev Dmitriy Yur'evich, M. D. Med., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Пронин Игорь Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия.

125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

+7 (499) 972-85-55

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Pronin Igor' Nikolaevich, M. D. Med., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

16, ul. 4-ya Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

+7 (499) 972-85-55

Author's contribution: approval of the final version of the publication – taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Research funding and conflict of interest

The study was not funded by any sources. The authors state that this work, its topic, subject and content do not affect competing interests. The opinions expressed in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Статья поступила в редакцию 24.10.2023;
одобрена после рецензирования 11.01.2024;
принята к публикации 11.01.2024.

The article was submitted 24.10.2023;
approved after reviewing 11.01.2024;
accepted for publication 11.01.2024.